

Rapports PSS N° 26 (Partie I)

Production Soudano-Sahélienne (PSS)
Exploitation optimale des éléments nutritifs en élevage

Projet de coopération scientifique

Influence des arbres agroforestiers sur le sol et la strate herbacée du Sud du Sahel

(étude particulière du phosphore)

Mémoire de maîtrise, Dép. d'Agronomie de l'Université Agronomique
de Wageningen* en collaboration avec l'Institut de la Biologie Agronomique
et de la Fertilité du Sol (AB-DLO)**

*Simône Radersma****

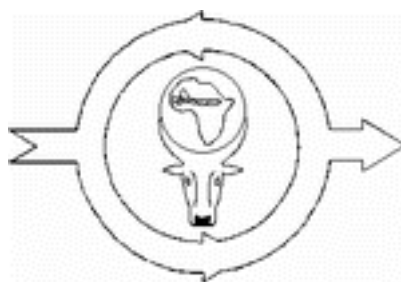
* Dép. Agronomic, AUW, Haarweg 333, 6709 RZ Wageningen, les Pays-Bas

** AB-DLO, B.P. 14, 6700 AA Wageningen, les Pays-Bas

*** ICRAF, P.O. Box 30677, Nairobi, Kenya

Mémoire couronnée du « Prix P.F.J. van Burg »
du NMI (Institut Néerlandais de la Gestion des Nutriments)

IER, Bamako
AB-DLO, Wageningen, Haren
DAN-UAW, Wageningen



PSS

Rapports PSS N° 26

Wageningen, 1996

Rapports du projet Production Soudano-Sahélienne (PSS)

Table de matières

- [Résumé](#)
 - [Préface](#)
 - [Introduction générale](#)
 - [Première partie :](#)
[Etude documentée sur l'influence des arbres sur la quantité et la disponibilité de phosphore au sein du système](#)
 - [I.1. Introduction](#)
 - [I.2. Influences de la matière organique sur les propriétés chimiques du sol, déterminant la disponibilité de P](#)
 - [I.2.1. Influence de la matière organique sur la capacité d'échange cation/anion](#)
 - [I.2.2. Adsorption de phosphate et concurrence pour les sites d'adsorption par les anions organiques](#)
 - [I.2.3. Précipitation de phosphate neutralisée par complexation de la matière organique](#)
 - [I.3. Matière organique de l'arbre comme source directe de phosphore agissant sur la disponibilité du phosphore](#)
 - [I.3.1. Minéralisation du phosphore organique par hydrolyses et décomposition](#)
 - [I.3.2. Influence de l'activité microbologique sur la minéralisation et immobilisation de P](#)
 - [I.3.3. Influence du \(micro\)climat sur la minéralisation de P](#)
 - [I.4. Influence de la matière organique \(d'arbre\) sur l'absorption de P via l'humidité du sol et l'extension racinaire](#)
 - [I.4.1. Influence de la matière organique \(d'arbre\) sur l'extension racinaire et l'humidité du sol, via son impact sur les propriétés physiques du sol](#)
 - [I.4.2. Influence de l'extension racinaire et activité sur l'absorption de P](#)
 - [Extension des racines et mycorhize](#)
 - [Exsudats racinaires](#)
 - [I.4.3. Influence de l'humidité du sol sur l'absorption de P](#)
 - [I.5. Influence des arbres sur l'humidité du sol lors d'une modification du microclimat](#)
 - [I.6. Discussion](#)
 - [Deuxième partie :](#)
[Comparaison de six espèces d'arbres et leur influence sur l'efficacité d'absorption des éléments nutritifs au sein du système herbe-sol](#)
 - [II.1. Introduction](#)
 - [II.2. Comparaison des propriétés chimiques du sol \(sous et en-dehors des frondaisons\)](#)
 - [II.2.1. Introduction](#)

- [II.2.2. Matériels et méthodes](#)
- [II.2.3. Résultats](#)
 - [Texture](#)
 - [Carbone organique](#)
 - [CEC](#)
 - [Mg + Ca : saturation et teneur](#)
 - [pH-H₂O, pH-KCL et pH](#)
 - [Azote :](#)
 - [Phosphore :](#)
- [II.2.4. Discussion](#)
 - [CEC, matière organique et texture](#)
 - [pH et saturation de la base](#)
 - [Influence des arbres](#)
 - [Phosphore](#)
- [II.2.5. Conclusion](#)
- [II.3. Décomposition de la litière d'arbre et fractionnement de la matière organique du sol](#)
 - [II.3.1. Introduction](#)
 - [II.3.2. Matériels et méthodes](#)
 - [II.3.3. Résultats](#)
 - [Décomposition de la litière et fractionnement](#)
 - [Fractionnement de la matière organique du sol](#)
 - [II.3.4. Discussion](#)
 - [Décomposition de la litière et fractionnement](#)
 - [Fractionnement de la matière organique du sol](#)
- [II.4. Evaluation de la redistribution des ressources et concurrence par étude des systèmes racinaires structuraux](#)
 - [II.4.1. Introduction](#)
 - [II.4.2. Matériels et méthodes](#)
 - [II.4.3. Résultats](#)
 - [II.4.4. Discussion](#)
- [II.5. Comparaison des teneurs du sol en humidité sous les arbres, et à l'extérieur des arbres](#)
 - [II.5.1. Introduction](#)
 - [II.5.2. Matériels et méthodes](#)
 - [II.5.3. Résultats](#)
 - [II.5.4. Discussion](#)
- [II.6. Comparaison de la biomasse et teneur nutritive de la strate herbacée sous les arbres et à l'extérieur des arbres](#)
 - [II.6.1. Introduction](#)

- [II.6.2. Matériels et méthodes](#)
- [II.6.3. Résultats](#)
- [II.6.4. Discussion](#)
- [II.7. Discussion \(d'ordre\) général et conclusion](#)
- [Remerciements](#)
- [Bibliographie](#)
- [Annexe I - Sols des savanes sahélienne et soudanienne](#)
- [Annexe II - Types de matière \(matières\) organique\(s\)](#)
- [Annexe III - Fertilisation par le phosphore](#)
- [Annexe IV - Calcul de la matière organique complémentaire du sol fournie par un arbre moyen de la zone Soudano-Sahélienne, en vue d'évaluer la différence possible entre la MOS sous et en-dehors de la frondaison](#)
- [Annexe V - Détermination des fractions de matière organique grossière via la méthode Ludox de Meyboom & Hassink](#)

« The research for this publication was financed by the Netherlands' Minister for Development Co-operation. Citation is encouraged. Short excerpts may be translated and/or reproduced without prior permission, on the condition that the source is indicated. For translation and/or reproduction in whole the Section DST/SO of the aforementioned Minister should be notified in advance (P.O. Box 20061, 2500 EB The Hague). Responsibility for the contents and for the opinions expressed rests solely with the authors; publication does not constitute an endorsement by the Netherlands' Minister for Development Co-operation ».

Résumé

On estime fréquemment que l'agroforesterie accroît la stabilité et la productivité d'un système dédié à l'utilisation des terres. En ce qui concerne l'influence des arbres sur l'efficacité de l'utilisation des éléments nutritifs, des recherches ont été réalisées pour la zone du Sud du Sahel où les éléments nutritifs représentent le frein principal à la production et où la dégradation des terres est un fait commun.

Deux parties composent cette étude : i) une étude documentée sur l'influence des arbres sur le cycle du phosphore, et ii) une caractérisation de six espèces d'arbres de cette région, avec leurs effets possibles sur l'absorption nutritive au sein de l'écosystème.

L'étude documentée se focalise sur les différentes façons dont les arbres influencent l'absorption de phosphore. Celle-ci est déterminée par i) la disponibilité de P à l'intérieur du sol, ii) l'extension racinaire des végétaux, et iii) l'humidité du sol.

L'arbre en tant que tel influence principalement ces facteurs d'absorption : i) par la matière organique

(quantité et qualité) et ii) en modifiant le microclimat.

Ces deux derniers facteurs liés à l'arbre, et les trois facteurs relatifs à l'absorption se rapportent aux propriétés physiques, chimiques et biologiques du sol, à l'infiltration et à l'évapotranspiration. Généralement parlant, il semble que les arbres accroissent l'absorption de P.

Deuxième partie : pour étudier l'influence de six espèces d'arbres sur l'efficacité d'utilisation des éléments nutritifs et la productivité de l'écosystème sur les sols sableux, on utilise les cinq méthodes suivantes :

- * analyses du sol pour comparer sa fertilité au-dessous et au-dehors de la frondaison des arbres
- * fractionnement de la matière organique du sol et décomposition de litière de feuilles et de branchages, afin de comparer la dynamique de la matière organique et le cycle nutritionnel au-dessous et en-dehors des frondaisons
- * mesures de l'humidité du sol au-dessous et au-dehors des frondaisons
- * étude du système racinaire structural pour évaluer la compétition pour les éléments nutritifs et à l'eau, et les amendements de ces substances et d'eau
- * prélèvement d'échantillon de strate herbacée et détermination du poids et de la teneur en phosphore et azote, au-dessous et au-dehors des frondaisons. Ceci a pour but d'évaluer l'équilibre net entre ce que les arbres ajoutent à la strate herbacée et ce pour quoi ils rivalisent avec elle, comme indicateur pour la productivité et l'efficacité d'utilisation des éléments nutritifs de l'écosystème.

Les résultats démontrent que les arbres des sols sableux de la zone du Sud du Sahel en général n'augmentent pas ni ne diminuent la biomasse, et la teneur en P et N de la strate herbacée. Il semblerait qu'ils utilisent ce qu'ils ajoutent à l'écosystème. Il se peut que ces ajouts, utilisés pour leur propre croissance, soient provoqués par un cycle nutritif quelque peu plus fermé et plus rapide.

Ces trois espèces présentent des différences :

- la disponibilité d'azote est quelque peu améliorée par *l'Acacia senegal* et le *Balanites aegyptiaca*. La disponibilité de phosphore est améliorée par tous les arbres, à l'exception du *Commiphora africana*.
- le quantité des fractions de matière organique grossière du sol s'accroît tout particulièrement sous *l'Acacia senegal* et *l'Acacia seyal*. C'est le *Balanites aegyptiaca* qui produit la décomposition de litière de feuilles favorisant au mieux le cycle nutritif, due également à une plus grande humidité du sol.
- l'humidité du sol - (et son importance pour le transport des éléments nutritifs) - est accrue par le *Balanites aegyptiaca*.
- le système racinaire structural du *Balanites aegyptiaca* est le moins concurrentiel ; l'enracinement profond de *l'Acacia seyal* et du *Combretum ghasalense* peut ajouter le plus de substances, à partir de couches plus profondes du sol.
- la biomasse de la strate herbacée peut être fortement limitée par une concurrence pour la lumière par les arbres, en raison de leurs frondaisons basses, tout particulièrement de *l'Acacia senegal*.

Préface

Cette étude traite des effets produits par les arbres sur l'environnement, de par l'influence qu'ils exercent sur le sol dans le système agroforestier du Sud du Sahel. Elle a été réalisée dans le cadre du « Projet Production Soudano-Sahélienne » (PSS) à Niono/Mali.

Ce projet vise à contribuer au développement de systèmes durables d'utilisation des sols, par les cultures et les pâtures, dans le Sud du Sahel et dans les régions du Nord du Soudan.

L'exploitation optimale des éléments nutritifs dans le système de culture et de pâture est au coeur de ce projet. Quatre équipes de recherche y travaillent, dont « l'Equipe Production Fourragère » (EPF) est responsable des recherches sur l'utilisation optimale des éléments nutritifs dans la production primaire des cultures légumineuses, des herbes pérennes et espèces ligneuses.

Cette étude sur les arbres a été réalisée comme partie intégrante du programme de recherche de l'EPF programme mis en place à la ferme de Niono, au Sud du Sahel.

Cette étude vise à représenter six espèces d'arbres par rapport à leur environnement, dans le but d'évaluer si ces arbres peuvent améliorer ou non l'efficacité d'utilisation des éléments nutritifs du système dans son ensemble.

La première partie est une étude documentée traitant de l'influence que peuvent avoir les arbres sur le cycle du phosphore.

La deuxième partie décrit six espèces d'arbres de la région : *Sclerocarya birrea*, *Acacia seyal*, *Acacia senegal*, *Commiphora africana*, *Balanites aegyptiaca* et *Combretum ghasalense*. Il s'agit d'étudier leur influence sur la fertilité chimique du sol, la matière organique du sol, l'humidité du sol et la strate herbacée, ainsi que d'examiner leurs systèmes racinaires structuraux et la décomposition de litière.

Introduction générale

Outre le problème de la sécheresse et de la distribution des pluies, un problème majeur est la faible fertilité des sols. Généralement, l'eau est un facteur plus restrictif au Nord de l'isohyète de 250 mm ; en allant vers le Sud, les éléments nutritifs deviennent le facteur limitant le plus la croissance végétale ([Bremen & Kessler - 1995](#)). Naturellement, ce déplacement est progressif. Les carences en azote et en phosphore constituent les facteurs principaux. Sur les terres agricoles, les périodes de jachère qui vont en se réduisant et leur occupation croissante par le bétail - en raison de la forte croissance de la population (2,6 % par an) - aggravent les carences du sol en éléments nutritifs. La durabilité de l'exploitation des terres n'est plus possible (Berry *et al.* - 1983).

Les questions d'importance sont : i) comment les ressources (éléments nutritifs, eau) peuvent-elles être utilisées le plus efficacement ? et ii) les apports d'éléments nutritifs d'extérieurs sont-ils économiquement réalisables ?

Dans les systèmes agroforestiers, les arbres peuvent accroître l'efficacité d'utilisation des éléments nutritifs ([Breman & Kessler - 1995](#)). Le système, ou le parc agroforestier concerne un écosystème constitué d'arbres ou d'arbrisseaux disséminés, associés à la strate herbacée naturelle ou aux cultures.

L'hypothèse selon laquelle les arbres jouent un rôle positif dans la savane peut paraître trop facile à échauder et ne correspond pas aux conclusions de Kessler & Breman (1991) par exemple. Ces derniers concluent que les arbres des régions Soudano-Sahéliennes provoquent principalement une redistribution de l'eau et des éléments nutritifs, au lieu de les ajouter au système à partir de ressources sous-exploitées. Plusieurs raisons expliquent cela :

- 1) dans les régions à plus fortes précipitations, les arbres peuvent capter les éléments nutritifs qui, sinon, lessiveraient le profil ; cette fonction de capteur n'a que peu ou pas d'importance dans les régions arides telles que le Sahel, où le lessivage en profondeur (au-dessous de 1,5/2 m) n'apparaît pas.
- 2) la fonction de capteur des racines d'arbres plus profondes n'est pas très vraisemblable d'autre part, puisqu'il semble que les systèmes racinaires les plus connus occupent principalement les premiers 60 cm du sol et ne forment pas de réseau-capteur au-dessous de cette profondeur (Rutherford, 1983 - Nair, 1984 - Soumaré, 1993).
- 3) de même, la fixation d'azote par les arbres légumineux ne se fait pas dans des proportions significatives : i) en raison du manque de phosphore, ii) en raison des longues périodes de sécheresse, empêchant à la fois la nodulation et la fixation ([Breman & Kessler - 1995](#)).
- 4) la fonction de pompe qu'ont les arbres (absorption d'eau et d'éléments nutritifs à partir des strates profondes du sol) est limitée en raison du manque de sources en profondeur : i) les sols se composent de matières originales pauvres en éléments nutritifs (ou sont fortement altérés), ii) les nappes phréatiques ne sont pas atteintes ([Penning de Vries & Djiteye - 1991](#))
- 5) la plupart des racines d'arbres occupent la surface du sol, jusqu'à plusieurs fois le diamètre de la houppier de l'arbre, ce qui peut provoquer une redistribution à partir de l'extérieur jusqu'au-dessous ou à l'intérieur de l'arbre. Ainsi, une amélioration possible des conditions de croissance à proximité des arbres peut se faire aux dépens des conditions de croissance entourant l'arbre, au lieu de constituer un amendement fourni par l'arbre même.
- 6) le piégeage de l'eau et des poussières par les couronnes des arbres constitue plus une redistribution qu'un amendement au système bien qu'on puisse considérer le piégeage des poussières et le freinage de l'érosion comme une réduction des pertes. Néanmoins, on préviendrait mieux la réduction d'érosion avec des herbes pérennes qu'avec les couvertures d'arbres bas (10 %) de ces régions-là ([Breman & Kessler - 1995](#))
- 7) autre type d'argument : le fait que la lumière puisse être utilisée de façon plus efficace dans des sites à

deux niveaux (arbre - strate herbacée) plutôt qu'en un espace ouvert (strate herbacée seulement) ne tient pas. Ceci est dû au fait que les herbes d'un champ ouvert sont principalement des espèces C_4 , non encore saturées en lumière ([Breman & Kessler - 1995](#)). Par ailleurs - étant donné que les éléments nutritifs et l'eau sont des facteurs plus restrictifs que la lumière, et que les arbres mêmes ainsi que de nombreuses herbes qui leur sont associées sont des espèces C_3 utilisant plus d'eau et de éléments nutritifs pour une croissance de biomasse inférieure, par rapport aux espèces C_4 - la présence des arbres peut provoquer une production totale de biomasse inférieure (bien que peut-être de meilleure qualité).

Néanmoins, dans un système constitué de cycles nutritifs aussi réduits que dans ces zones-là, même de très faibles apports peuvent revêtir une importance relative. *L'Acacia seyal* doit ainsi se procurer de l'eau et des éléments nutritifs dans les profondeurs, via sa racine pivotante ; en effet, les arbres dont le pivot est endommagé présentent une augmentation importante de leurs racines au-dessous de la surface ([Soumaré et al. - 1993](#)). Les arbres peuvent avoir des « influences positives » autres qu'un seul amendement au système : ils affectent le microclimat (vitesse et mouvements du vent, humidité, évapotranspiration, intensité lumineuse). Ceci peut à son tour exercer une influence sur la composition des espèces, les facteurs liés au sol, l'érosion et la dégradation hors site due à l'érosion (Young - 1991, Nair, 1984).

La redistribution peut constituer un avantage au coeur d'un système enclin à la sécheresse et à la dégradation, étant donné que i) dans un contexte où des plantes pourraient mourir si les ressources étaient réparties de façon égale, des plantes peuvent survivre en des lieux de concentration de ressources, et ii) si les ressources sont faibles, la concentration nutritive est un avantage parce que la relation entre la productivité et les ressources existantes est représentée par une courbe sigmoïde. Ainsi, la production moyenne d'un système où l'on a concentré de faibles ressources est supérieure à celle d'un système aux ressources uniment distribuées ([Breman & Kessler - 1995](#)).

Principale question : un système agroforestier peuplé d'arbres de la zone Soudano-Sahélienne est-il plus efficace en matière d'utilisation des éléments nutritifs (et de l'eau) qu'un système dépourvu d'arbres. On suppose en général qu'il en est ainsi, parce que :

- les cycles nutritifs des systèmes avec arbres sont moins ouverts que les systèmes sans arbres, en raison du cycle nutritif interne des arbres,
 - dans un système avec arbres, les transferts et pertes sont inférieurs à ceux d'un système sans arbres.
- (Young - 1991 ; [Breman & Kessler - 1995](#)).

On étudiera l'hypothèse selon laquelle les arbres pourraient favoriser une meilleure efficacité d'utilisation des éléments nutritifs : i) par une étude documentée sur l'influence des arbres sur l'absorption de phosphore, et ii) en étudiant l'influence qu'exercent six espèces d'arbres sur le sol et sur la strate herbacée.

Première partie :

Etude documentée sur l'influence des arbres sur la quantité et la disponibilité de phosphore au sein du système

I.1. Introduction

Le phosphore est, avec l'azote, un élément nutritif restrictif important dans la savane/le sahel de l'Afrique Occidentale. Il existe peu de documents écrits sur la façon dont les arbres influent sur l'équilibre et le cycle du phosphore ; on ne sait pas très bien non plus si et de quelle façon les arbres peuvent accroître l'efficacité d'utilisation du phosphore au sein de l'écosystème.

Trois facteurs primordiaux permettant de déterminer l'absorption de P par les plantes sont :

- la disponibilité du sol en P
- l'humidité du sol permettant la diffusion du phosphore disponible, en direction des racines
- l'extension et la distribution des racines, et leur capacité à « atteindre » le phosphore à l'intérieur du sol.

Les arbres peuvent exercer une influence sur ce qui précède, de deux façons principalement :

- par leur apport en matière organique, de quantité et qualité différentes
- par leur influence sur le microclimat.

Ceci est représenté dans la figure I.1.

[Figure I.1.](#) Facteurs d'absorption de P et facteurs liés aux arbres, et pouvant les influencer.

L'importance des arbres et la façon dont ils influencent le cycle de P dépendent largement du type de sol et du climat.

Selon Jones & Wild (1975), les sols de la savane de l'Afrique Occidentale se déplacent du Sud au Nord - depuis les sols ferrugineux avec entre 500 à 1200 mm de précipitations annuelles jusqu'aux sols bruns et bruns-roux des zones arides et semi-arides avec des précipitations annuelles inférieures à 500 mm ([annexe 1](#)). Le niveau d'altération et de lessivage diminue du Sud au Nord ainsi que les profondeurs des profils. Bien que la formation du sol s'est faite en partie à des époques où les régions aujourd'hui plus sèches étaient exposées à un climat plus humide, les profils demeurent peu profonds du fait de la perte de sol en surface qui s'en est ensuivie.

L'influence exercée par les arbres sur l'absorption de phosphore fera l'objet d'une discussion reliant les facteurs liés aux arbres (à gauche de la fig. I.1) aux facteurs d'absorption du phosphore (à droite de la fig. I.1), à la suite de quoi on débattrait de l'importance des divers mécanismes, pour les sols sableux de la ferme de Niono dans la zone du Sud du Sahel. La présentation sera illustrée par des schémas (figures I.2a, b, etc.), qui sont combinés finalement dans une seule [figure I.2](#), une forme élaborée de la figure I.1.

I.2. Influences de la matière organique sur les propriétés chimiques du sol, déterminant la disponibilité de P

La matière organique est soit une source directe de phosphore, ou bien influence l'absorption de P via divers effets s'exerçant sur les propriétés chimiques, physiques et biologiques du sol (Coleman *et al.* - 1989).

Nous débattons dans ce chapitre de l'influence de la matière organique sur les propriétés chimiques du sol, déterminant la disponibilité de phosphore.

Selon la quantité et la nature de la matière organique du sol, les propriétés chimiques correspondantes sont influencées par : le pH, le point zéro de la charge (pzc) et le CEC/CEA. La matière organique forme des complexes avec d'autres ions qui ont un impact sur la présence de phosphore.

C'est la première liaison représentée à la [figure I.1](#), entre la matière organique de l'arbre et la disponibilité de phosphore. On en trouve le résumé à la figure I.2 - bloc A

[Figure I.2. Bloc A :](#) Effets de la matière organique sur les propriétés chimiques du sol et disponibilité de phosphore.

(tree->arbre ; zpc->pzc ; AEC->CEA ; availability->disponibilité)

I.2.1. Influence de la matière organique sur la capacité d'échange cation/anion

La capacité d'échange de cation (CEC) et la capacité d'échange d'anion (CEA) sont déterminées par les minéraux argileux et la matière organique.

Sous l'altération atmosphérique, les oxydes (hydroxydes) de fer et d'aluminium augmenteront considérablement, remplaçant les argiles cristallins 2 :1 et la kaolinite. La charge électrique en surface de ces minéraux est fonction du pH - charge provoquée par la protonation et déprotonation des groupes d'hydroxyles en surface. La charge électrique de la kaolinite et des argiles cristallins 2 : 1 est fixe. Généralement, ce déplacement de composition minérale se faisant sous l'effet de l'altération atmosphérique, la CEA augmente et la CEC diminue. Cette tendance est renforcée en présence d'un pH décroissant.

Tout particulièrement dans les sols avec une faible volume de minéraux argileux à charge fixe (spécialement les argiles cristallins 2 :1) et une faible charge en surface à partir de cette source, la CEC/CEA est principalement déterminée par la matière organique (fraction stable) et les sesquioxides (oxydes (hydroxydes) de fer et d'aluminium) qui sont des molécules à charge variable.

A un certain pH (point zéro de charge ou pH_0), la charge nette de ces colloïdes à charge variable est égale à zéro. Lorsque le pH est au-dessous de cette valeur, la charge nette de ces colloïdes est positive ; lorsque le pH est au-dessus de cette valeur, la charge nette de ces colloïdes est négative.

Lorsque le pH décroît, la CEC décroît et la CEA augmente - tandis que lorsque le pH s'accroît, la CEC s'accroît et la CEA diminue.

Les valeurs du point zéro de charge et le mécanisme de protonation et déprotonation, dans le cadre de déplacements de pH, sont indiqués à la figure I.3.

Figure I.3. Valeurs du point zéro de charge et mécanisme de l'association ou dissociation de proton pour des oxydes Fe/Al et molécules organiques.

Les silicates de couche 2 : 1 sont des colloïdes à charge permanente. Celle-ci est provoquée par substitution d' Al^{3+} en Si^{4+} dans les couches tétraédriques, ou bien de Mg^{2+} en l' Al^{3+} dans les couches octaédriques. Cette charge est fixe et indépendante du pH. Dans les silicates de couche 1 : 1 (kaolinite), cette substitution ne survient que dans une faible mesure ; conséquemment, ses charge intrinsèque et CEC sont faibles.

Tous les colloïdes chargés résultent ensemble en un pzc du sol en vrac. Le pzc du sol en vrac est élevé en présence d'un fort taux d'oxydes (hydroxydes) Fe/Al, et est plus faible si les teneurs en matière organique sont élevées ; il est au plus bas si les colloïdes à charge fixe dominant. Le pzc du sol est un excellent indicateur des propriétés de ce sol. Un pzc élevé (4,0) peut indiquer :

- la présence de colloïdes à charge variable principalement
- une importante adsorption d'anions (par ex. : phosphate)
- des interactions entre l'adsorption d'anion (particulièrement : le phosphate) et l'adsorption de cation. Du fait que les anions subissent fréquemment une adsorption chimique ou sont spécifiquement adsorbés sur des colloïdes à charge variable, la charge du nouveau complexe peut être négative, augmentant ainsi la CEC.

Pour un sol dont le pH se situe entre 4 et 6, la matière organique a une charge nette négative et contribue ainsi à la CEC. Les oxydes (hydroxydes) de Fe et Al ont une charge positive nette, contribuant principalement à la CEA et augmentant le pzc du sol en vrac.

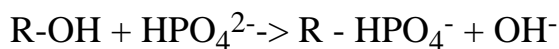
La matière organique fait baisser le pzc du sol par son propre pH_0 faible et aussi parce que la réaction entre les anions organiques négativement chargés et les sites d'oxyde positivement chargés favoriseront une prédominance des sites déprotonisés (négativement chargés), abaissant le pzc global (Coleman *et al.* - 1989).

Un pH faible accroît aussi la solubilité de l'Al et l' Al^{3+} bloque la charge négative, occupant une partie de la CEC.

I.2.2. Adsorption de phosphate et concurrence pour les sites d'adsorption par les anions organiques

L'adsorption de phosphate par différents minéraux argileux peut être classifiée comme suit : montmorillonite « kaolinite < goéthite - gibbsite < oxydes (hydroxydes) amorphes Fe/Al. La liaison entre les surfaces de phosphate et d'oxyde est plus forte que pour les autres anions, seuls de larges anions organiques entrant en concurrence avec le phosphate, abaissant ainsi le pzc. Les anions organiques (bicarbonates, citrate, polyalacturonate) rivalisent avec le phosphate pour les sites d'adsorption en raison du fait que ces grands anions organiques sont fermement retenus par les surfaces colloïdales, effet résultant à la fois des forces électrostatiques et des forces de v.d. Waals (Stoop - 1974).

L'adsorption de P sera accrue si l'on ajoute des cations polyvalents et si l'on augmente les concentrations salines : les cations polyvalents subissent une adsorption chimique par rapport aux sites négativement chargés. Si leur charge positive est supérieure à la charge négative d'origine, ils peuvent constituer des sites positivement chargés. Ces nouveaux sites positifs forment des sites d'adsorption pour des anions tels que le phosphate. A son tour, l'adsorption de P peut provoquer une adsorption de cation accrue, au cas où le phosphate subit une adsorption chimique comme dans :



(ajoute à la CEC)

Les courbes de désorption de phosphore ne coïncident pas avec leurs équivalents en terme d'adsorption. Mais les courbes déterminées en laboratoire ne prévoient pas l'absorption des cultures (Westerman - 1990). L'adsorption croissante de P résulte de la valeur croissante de pzc (point zéro de charge) du sol en vrac, ou du pH en diminution dans un sol à charge variable.

[Figure I.4.](#) Courbes idéales d'adsorption et de désorption de phosphore.

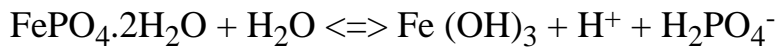
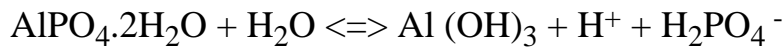
(sorbed P->P adsorbé ; P in solution->P en solution)

I.2.3. Précipitation de phosphate neutralisée par complexation de la matière organique

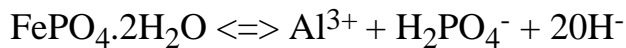
Le phosphate peut être précipité par les ions d' Al^{3+} ou de Fe^{3+} , principalement sous la forme de variscite ($\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ou de strengite ($\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

Les concentrations d' Al^{3+} et de Fe^{3+} dans le sol sont déterminées par l'équilibre avec $\text{Al}(\text{OH})_3$ et $\text{Fe}(\text{OH})_3$ respectivement.

La précipitation/dissolution est régie par les réactions suivantes :

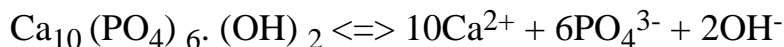


impliquant que P devient plus soluble lorsque le pH augmente. Si l'on suppose que la réaction suivante :



est valable, P serait moins soluble avec un pH en augmentation. Néanmoins, ce n'est pas le cas de la variscite ou de la strengite. Cela signifie qu'en présence d'un pH accru, une quantité plus grande de phosphate est dissoute à partir de ces précipités (au lieu d'une quantité moindre si l'on prend seulement en compte les réactions de dissolution).

Dans le cas des phosphates précipités par le calcium, seule la réaction pure et simple de dissolution/précipitation joue un rôle dans des gammes normales de pH (équilibre avec le CaCO_3 : seulement à un pH élevé) -



signifiant que lorsque le pH augmente, la précipitation de phosphates de calcium est plus importante (Novozamsky & Beek dans : Janssen - 1978).

Ainsi, la précipitation de phosphate dépend des concentrations de Al^{3+} , Fe^{3+} et Ca^{2+} en solution, du rapport de Al+Fe sur Ca et du pH. Lorsque les concentrations en Ca^{2+} sont assez élevées, une réduction du pH renforce la disponibilité du phosphate. Lorsque les concentrations en $\text{Al}^{3+}/\text{Fe}^{3+}$ sont assez élevées, une augmentation du pH renforce la présence de phosphate. A valeur égale, le pH optimal est d'environ 5,5 et la précipitation de P est au minimum.

Figure I.5. Diagramme de précipitation/dissolution des phosphates d'Al, de Fe et de Ca (Westerman - 1990).

(log activity -> représentation logarithmique)

Les complexes de matière organiques avec Fe/Al/Ca peuvent réduire la précipitation de phosphate en abaissant le niveau d'activité des ions de Fe/Al/Ca en solution ; il se peut même que la matière organique accroisse la dissolution de P en formant des complexes avec Fe, Al, et Ca, sur lesquels P subit une adsorption.

Les anions organiques peuvent former des complexes avec des cations polyvalents (Al^{3+} , Fe^{3+} , Ca^{2+}) provoquant même une inversion de charge, résultant en une forte adsorption par la fraction argileuse. Fe^{3+} , Al^{3+} et Ca^{2+} forment des complexes avec des ligand organiques. Les chélates sont des complexes au sein desquels un ion métallique agit en tant que récepteur de deux paires d'électrons ou plus, données par une molécule à ligand organique simple. Une structure cyclique multiple ou unique est formée, chaque cycle étant constitué de l'ion métallique et, d'ordinaire, de 4 à 6 atomes à partir de la molécule de ligand. Certains de ces chélates sont extrêmement stables, et les concentrations de métaux fortement chélatés - particulièrement Fe^{3+} et Ca^{2+} - peuvent avoir une ampleur considérablement plus importante que les concentrations de ions métalliques libres dans des solutions du sol. Al est plus important que Fe, puisque Al est plus mobile du fait que son produit de solubilité a une ampleur deux fois inférieure, de telle sorte que la concentration d'Al est 10 fois ou plus supérieure à la concentration de Fe (Coleman *et al.* - 1989). La stabilité du chélate diminue lorsque le pH diminue, parce que le H^+ constituant l'électron se lie au ligand, déplaçant ainsi des ions métalliques. Néanmoins, si l'activité de l'ion métallique est contrôlée par la solubilité, les effets d'une modification du pH sur la solution/précipitation sont beaucoup plus importants.

La séquence d'adsorption et de précipitation peut se faire comme suit : i) adsorption à la surface des particules, ii) sursaturation au niveau des réactants dans la réaction de précipitation, iii) nucléation du précipité à la surface des particules, iv) cristallogénèse. C'est seulement en présence du précipité que le produit de solubilité de la réaction de précipitation peut contrôler les activités de l'espèce en réaction. Il se peut même qu'une sous-saturation et sursaturation se produisent si l'apport ou la perte de réactants survient plus rapidement que le rééquilibrage avec le précipité (Westerman, 1990).

En résumé : la capacité d'adsorption d'un sol, pour les anions, est réduite par la matière organique lorsque le pH est 4, diminuant ainsi l'adsorption de phosphate. Cette capacité peut être en partie bloquée par les anions organiques, diminuant ainsi l'adsorption de phosphate une fois encore. La « capacité de précipitation » d'un sol, pour des anions tels que le phosphate constitué de ions de Fe, Al et Ca, peut être en partie utilisée pour la complexation avec des anions organiques, diminuant ainsi la précipitation de phosphate.

I.3. Matière organique de l'arbre comme source directe de phosphore agissant sur la disponibilité du phosphore

L'autre fonction de la matière organique est d'être une source directe de phosphore. Tandis que les sols subissent l'altération atmosphérique, l'importance du phosphore organique en tant que source nutritive augmente (Coleman *et al.* - 1989).

Voici un autre lien entre la matière organique de l'arbre et la présence de P, représenté à la [figure I.1](#) ainsi qu'à la figure I.2 - bloc B

[Figure I.2. Bloc B](#) : Effets de la matière organique sur la minéralisation de P, l'activité microbienne et

la disponibilité de P.

(tree -> arbre ; availability -> disponibilité)

I.3.1. Minéralisation du phosphore organique par hydrolyses et décomposition

La libération de phosphore à partir de la matière organique se fait de deux façons. La plus grande partie du phosphore présent dans la matière organique l'est sous forme d'esters ou d'acide orthophosphorique. La minéralisation du P est partiellement découplée de la minéralisation de C et N puisque P apparaît presque entièrement sous forme d'ester (C-O-P) tandis que N est homopolairement lié directement à C (Coleman *et al.* - 1989). L'hydrolyse d'esters est régulée par la demande en élément nutritif. Alors que la minéralisation d'éléments liés homopolairement à C est régulée par la demande en énergie de C, le P organique peut subir une hydrolyse extra-cellulaire et être minéralisé sans dégradation de C.

De la sorte, la libération de phosphore subit l'influence de l'activité (et de la présence) des racines (cf. 4.2) et des microbes.

Le phosphore peut également être assimilé et minéralisé avec oxydation du C correspondant. De la sorte, la vitesse de décomposition et libération du phosphore est déterminée par la qualité de la matière organique ([annexe 2](#)) et subit l'influence de l'activité microbiologique et du (micro)climat.

I.3.2. Influence de l'activité microbiologique sur la minéralisation et immobilisation de P

L'activité microbiologique exerce une influence sur la matière organique du sol, en agissant directement sur les processus métaboliques, et indirectement en affectant les apports de litière et la décomposition. Elle provoque la formation et la dégradation d'agrégats du sol et modifie les propriétés physiques du sol.

Les microbes contiennent 1 à 5 % de C et N organique. Le recyclage est rapide.

Les micro-organismes peuvent avoir des effets hormonaux sur la morphologie racinaire, favorisant ainsi l'acquisition de éléments nutritifs à peine solubles telles que le phosphore (Marschner - 1991).

Les micro-organismes peuvent accroître l'acquisition de élément nutritif par la plante si l'on utilise des cellules ébouffées ou des sucres, en produisant des agents de chélation tels que les acides organiques ou sidérolithique. D'autre part, les micro-organismes peuvent réduire l'acquisition nutritive par la plante, lorsque les exsudats augmentant la disponibilité de P sont transformés. (cf. 4.2)

Dans la rhizosphère, les micro-organismes n'occupent qu'un faible pourcentage de la surface des racines, et ceci principalement à l'arrière de la zone du poil radiculaire où émergent les racines latérales. Pendant

le processus de décomposition, P peut être immobilisé par incorporation dans des cellules microbiennes si la concentration nutritive de la matière organique est insuffisante. Ceci a du sens, lorsque la litière a un rapport C/P supérieur à 100-500 ([Breman & Kessler - 1995](#)).

L'activité microbienne a des effets additionnelles sur le système sol-végétaux, effets qui peuvent être définis moins facilement.

Un apport permanent et important de matière organique soutient l'activité micro-biologique.

I.3.3. Influence du (micro)climat sur la minéralisation de P

La décomposition et l'hydrolyse sont influencées par la température et le régime d'humidité, qui subissent à leur tour l'influence d'un arbre (cf. 5).

Lorsque la matière organique est sévèrement séchée ou chauffée (au cours d'une longue saison sèche), elle sera rapidement minéralisée par réhumidification (premières averses), en raison de la dégradation de complexes de matière organique physiquement protégés et de l'accélération de rotation de la biomasse microbienne (Coleman *et al.* - 1989). Ceci survient à nouveau, dans une moindre mesure, à la suite de périodes de sécheresse en cours de saison humide. En présence de température et régime d'humidité moins extrêmes, le procès de minéralisation peut se faire plus régulièrement. L'hydrolyse de P sous forme d'ester peut avoir lieu sur une période plus longue, si la terre est plus humide. On estime fréquemment qu'un lent dégagement de éléments nutritifs à partir de la matière organique du sol présente des avantages, à la fois pour les éléments nutritifs solubles telles que N ainsi que pour les éléments nutritifs qui rentrent en interaction avec les surfaces du sol et sont moins disponibles - c'est le cas du P (Coleman *et al.*, 1989).

I.4. Influence de la matière organique (d'arbre) sur l'absorption de P via l'humidité du sol et l'extension racinaire

L'autre façon dont la matière organique (d'arbre) influence l'absorption de P ([figure I.1](#)) se fait au travers de son influence sur les propriétés physiques du sol. De meilleures propriétés physiques du sol favorisent le développement racinaire et accroissent l'humidité du sol. La figure I.2 / bloc C résume cela.

[Figure I.2. Bloc C](#) : Effets de la matière organique sur les propriétés physiques du sol, extension racinaire et humidité du sol.

(tree -> arbre ; P-uptake -> absorption de P ; water hold cap. -> capacité de rétention d'eau)

I.4.1. Influence de la matière organique (d'arbre) sur l'extension racinaire et l'humidité du sol, via son impact sur les propriétés physiques du sol

Un arbre peut fournir au sol des types de matière organique plus stables ([annexe 2](#)) et en quantités supérieures, ce qui peut améliorer les propriétés physiques du sol : meilleure stabilité structurale et quantité équilibrée de pores larges, moyens et fins.

Ces manifestations physiques sont le fruit de l'action des gommages organiques (et mycélium fongique) liant les particules du sol pour en faire des agrégats, ainsi que de la croissance et de la décomposition des systèmes racinaires. D'autres composés de stabilisation structurale sont les sesquioxides - la matière organique prenant moins d'importance pour les propriétés physiques du sol lorsque la teneur en sesquioxide augmente (ou en présence d'une texture mieux équilibrée du sol en vrac).

L'eau et l'air sont acheminés via les larges pores, qui accroissent la capacité d'infiltration.

Les pores fins augmentent la capacité de rétention d'eau d'un sol.

Des quantités importantes de matière organique - qui ont des effets favorables sur les propriétés physiques du sol - peuvent servir de solide support à la croissance et à l'extension des racines (Coleman *et al.* - 1989), comme Cissé & Vachaud (1987) l'ont indiqué pour un sol sableux grossier et pauvre du Sénégal dans laquelle un apport de matière organique de 10 t par hectare pendant 2 années (précipitations : 300 mm/an) a fait chuté le lessivage au-dessous de 1,5 m, d'environ 50 mm d'eau et 13 kg / hectare de N, 10 kg/ha de Ca et 2 kg/hectare de Mg et K, principalement à cause d'un enracinement plus important.

I.4.2. Influence de l'extension racinaire et activité sur l'absorption de P

La quantité de éléments nutritifs disponibles - comme le montrent les analyses de sol - n'a fréquemment que peu de rapport avec la véritable absorption nutritive par les végétaux, parce que les facteurs d'extraction ne sont pas pris en considération. En matière d'acquisition de éléments nutritifs minéraux peu mobiles à l'intérieur du sol (comme le phosphore), la croissance et l'extension des racines sont particulièrement importantes, et sont favorisées par les bonnes propriétés physiques du sol. La matière organique et l'activité biologique améliorent ses propriétés physiques. Les racines et leurs exsudats influencent le pH, le potentiel réduction/oxydation et l'activité microbienne - le tout ayant des effets sur l'absorption des éléments nutritifs minéraux

Extension des racines et mycorhize

Pour un élément nutritif minéral donné, la zone d'épuisement dépend entre autres de la densité de l'enracinement et de la longueur des poils radiculaires.

La distance sur laquelle une racine (poil radiculaire) extrait un élément nutritif dépend de la teneur en humidité et de la mobilité de cet élément. Le phosphore est la élément nutritive la moins mobile (P K N) (cf. 5.3). Pour P, la zone d'épuisement autour des racines est très petite ; des densités d'enracinement supérieures augmentent l'absorption de P et deviennent rarement compétitives pour cet élément,

particulièrement dans des conditions de sécheresse (Marschner - 1991).

Les racines de la plupart (90 %) des végétaux issus du sol sont associées aux mycorhizes. Ces dernières infectent le cortex de la racine ou pénètrent l'espace intercellulaire du cortex, prolongeant leur mycelium externe à l'intérieur du sol (Marschner - 1991 ; Mounsain - 1993). L'augmentation de la surface de la racine par les mycelia favorise particulièrement l'absorption de phosphore. Le large système d'absorption à ramification favorise la résistance à la sécheresse, l'eau étant absorbée par ajustement osmotique à l'intérieur des cellules, et ceci même lorsqu'il y a très peu d'eau. La résistance au flux hydraulique est inférieure (50 %) à celle des racines, résultant en une plus forte absorption d'eau et de élément nutritive. Lorsque la sécheresse sévit, les racines perdent fréquemment le contact direct avec le sol, tandis que les mycelia conservent ce contact. Une infection et une extension des mycorhizes sont des phénomènes survenant plus fortement dans des conditions d'humidité du sol favorables : ni trop sec, ni trop humide, avec des conditions optimums différentes d'une espèce à l'autre (Mousain - 1993).

Exsudats racinaires

La manière et la mesure dans lesquelles les racines modifient la rhizosphère sont fonction des facteurs du sol et des végétaux, tels que l'apport nutritif, l'état nutritionnel de la plante, l'aération du sol et le génotype de la plante (Quirk - 1967 ; Marschner - 1991).

Jusqu'à 50 à 75 % du carbone fixé dans la photosynthèse se dégage dans la rhizosphère sous forme de carbone organique, dans les régions semi-arides de la Californie ([Bremner & Kessler - 1995](#)). Ceci peut s'avérer considérablement supérieur à ce que fournit la chute de litière (Coleman *et al.* - 1989). De jeunes racines à la croissance active dégagent en permanence de la matière organique riche en hydrate de carbone (Nair - 1984). Le stress - par ex. le manque de phosphore - peut accroître ce dégagement de carbone. Le carbone organique ainsi dégagé est constitué de trois éléments : a) des cellules éboulées et leurs lysats, b) une matière gélatineuse d'un poids moléculaire élevé (polysaccharides, acides polyuroniques), et c) des solutés organiques d'un poids moléculaire faible (sucres, acides organiques, aminoacides et phénols).

Les acides organiques réduisent le pH et peuvent accroître la solubilité des phosphates de calcium (Marschner - 1991). Le pH de la rhizosphère peut être inférieur de 2 unités au pH du sol en vrac, au cas où l'absorption déséquilibrée de cation/anion et le dégagement de H^+ viennent l'équilibrer. Certains composés de poids moléculaire faible sont des agents complexants, et certains des composés de poids moléculaire supérieur produisent un échange de cation et des sites d'absorption spécifiques (Westerman - 1990). Ceci peut accroître la disponibilité et l'absorption de P (cf. 2). Les cellules éboulées et leurs lysats favorisent l'activité microbienne et influencent ainsi la présence de éléments nutritifs. En réponse au manque de P, les racines peuvent excréter aussi de l' H^+ , même sans déséquilibre cation/anion (Coleman *et al.*, 1989 - Marschner, 1991).

Les composés de phosphore organiques subissent rapidement une hydrolyse par les racines de la plante, via l'activité de la phosphatase portée par les racines. Les phosphatases sont des ectoenzymes adaptables

dont l'activité augmente lorsqu'il y a manque de phosphore. L'activité de la phosphatase portée par la racine peut largement dépasser le taux d'absorption du phosphore inorganique hydrolysé, représenté par l'épuisement de phosphore organique à partir de la rhizosphère tandis que le phosphore inorganique peut s'accumuler (Marschner - 1991). L'activité de la phosphatase est importante dans les sols qui sont relativement riches en P organique.

I.4.3. Influence de l'humidité du sol sur l'absorption de P

Les modifications de la teneur en eau du sol peuvent exercer une grande influence sur les processus physiques du sol, influençant la disponibilité des éléments nutritives pour les végétaux. L'acheminement du phosphate dans le sol est fonction de la diffusion, puisque la fourniture de P via le flux massique ne couvre pas la demande en P. Le coefficient de diffusion est une fonction quadratique de la teneur en humidité (), ce qui signifie que la diffusion de P et l'absorption augmentent de façon exponentielle lorsque la teneur en humidité du sol augmente. La diffusion est tout particulièrement réduite au-dessous d'une teneur en humidité de 10-15 % (de Willigen & van Noordwijk - 1987).

[Figure I.6.](#) Relation entre le coefficient de diffusion du phosphore et l'humidité du sol.

(diff. coef. ->coefficient de diffusion)

I.5. Influence des arbres sur l'humidité du sol lors d'une modification du microclimat

Les arbres exercent une influence sur plusieurs facteurs climatiques de l'environnement : réduction de la vitesse du vent en général (malgré des turbulences croissantes), des précipitations et de la température, et hygrométrie croissante (et radiation réduite) sous leurs frondaisons (Schoch - 1965 ; [Bremner & Kessler - 1995](#)). Ils exercent de la sorte une influence sur l'humidité du sol et l'absorption de P par la plante. Cette relation entre les deux faces de la [figure I.1](#) est résumée dans la figure I.2 / bloc D.

[Figure I.2. Bloc D :](#) Effets de l'arbre sur le microclimat et l'humidité du sol.

(tree -> arbre ; soil-humidity -> humidité du sol ; air humidity -> hygrométrie ; wind speed -> vitesse du vent)

Lorsque la vitesse du vent et la température diminuent, et qu'à son tour l'hygrométrie s'accroît, il y a réduction de l'évaporation et de la transpiration sous l'arbre. D'autre part, c'est la transpiration totale de la zone qui augmente parce que l'arbre est un consommateur d'eau supplémentaire, dont l'efficacité est basse. L'efficacité et l'importance de la transpiration diffèrent selon les espèces d'arbres, en fonction de la physiologie (Grouzis *et al.* - 1993 ; Laffray & Longuet - 1993).

[Figure I.2.](#) Effets des arbres sur l'absorption de P.

(tree -> arbre ; pzc -> zpc ; AEC -> CEA ; P-avail. -> disponibilité de P ; waterhold cap. -> capacité de rétention d'eau ; P-uptake -> absorption de P ; phys. soil properties -> propriétés physiques du sol ; rain intensity -> intensité des précipitations ; soil-humid -> humidité du sol ; air humidity -> hygrométrie ; wind speed -> vitesse

du vent)

I.6. Discussion

L'importance relative des divers mécanismes suivant lesquels un arbre exerce une influence sur l'absorption de P dépend du type de sol et du climat - conséquemment, elle est différente d'un site à un autre. Bien que n'ayant pas découvert de nombreuses données quantitatives, je vais débattre de l'importance relative de ces mécanismes pour les sols sableux de la ferme de Niono, au Sud du Sahel. Une vue d'ensemble est présentée par la [figure I.2](#) complète.

Le rôle joué par la matière organique complémentaire fournie par les arbres, dans le blocage des sites d'adsorption de P et dans l'augmentation du pzc devrait être réduit : la CEA, la capacité d'adsorption du phosphate et la précipitation de phosphate par Fe^{3+} et Al^{3+} sont faibles - pourquoi ? i) parce que les sols ne sont pas fortement altérés, et ne contiennent donc pas beaucoup de Fe et Al libres (Jones & Wild - 1975 ; [Penning de Vries & Djiteye - 1991](#)), ii) parce que les sols qui se sont formés sous des climats chauds et secs, avec au moins une période de sécheresse pendant l'année, contiennent des oxydes hautement cristallins avec des surfaces peu élevées, dont l'importance est quantitativement faible dans les interactions avec les matières organiques ou le phosphate (Coleman *et al.* - 1989).

Dans ces sols-là, la concentration de Ca^{2+} est assez forte (bien que faible en quantités absolues puisque les sols sont pauvres) de telle sorte que le phosphate peut être précipité par le Ca^{2+} . Néanmoins, le pH des sols est trop bas pour la précipitation du phosphate de calcium.

Ce pH bas peut faire en sorte que - bien que la capacité d'adsorption/précipitation du fer et de l'aluminium soit basse - les hydroxydes Fe/Al et les ions $\text{Fe}^{3+}/\text{Al}^{3+}$, s'ils sont présents, peuvent adsorber/précipiter avec des anions organiques ou de phosphate. La présence d'anions organiques peut donc continuer à réduire l'adsorption déjà basse, ainsi que la précipitation de phosphate par le fer et l'aluminium.

Il serait intéressant de savoir si la capacité d'adsorption/précipitation « basse » par le Fe et l'Al se situe également à un niveau bas par rapport à la teneur en phosphore, ou bien si la teneur en P est elle-même si basse qu'une perte considérable de phosphore disponible résulte de cette capacité d'absorption/précipitation.

La matière organique en tant que source directe de phosphore peut être importante pour l'absorption végétale. Jones & Wild (1975) ont découvert, pour les savanes de l'Afrique Occidentale, une teneur moyenne en phosphore de 36-39 % sous forme organique. En ce qui concerne la ferme de Niono, celle-ci est d'environ 20 % ([Penning de Vries & Djiteye - 1991](#)).

Pour la ferme de Niono, le P disponible - tel que déterminé par les analyses du sol - n'excède pas 10 % du P total ([Penning de Vries & Djiteye - 1991](#)). Etant donné que l'activité racinaire peut procurer du P

organique lorsqu'une plante en a besoin, la disponibilité réelle du P peut se rapprocher du pourcentage de P organique. Un apport complémentaire de P organique fourni par la matière organique de l'arbre peut favoriser ce mode d'acquisition de P par les végétaux.

Un dégagement plus régulier de P organique dû à l'influence des arbres sur le microclimat - par comparaison aux flux de minéralisation plus forts en-dehors des arbres - peut avoir une moindre importance, étant donné que les capacités d'adsorption et précipitation et le lessivage sont faibles et que le phosphore ainsi libéré peut demeurer disponible.

Le rôle joué par la matière organique complémentaire fournie par les arbres, en faveur des propriétés physiques du sol, peut être relativement important - augmentant ainsi l'extension racinaire et l'humidité du sol. L'importance de la matière organique pour les propriétés physiques du sol est assez grande, parce que les sesquioxydes et teneurs argileuses sont bas.

Dans les régions arides, il peut être assez important d'augmenter l'extension racinaire et l'humidité du sol pour atteindre et transporter le phosphore.

Les mycorhizes - favorisant particulièrement l'absorption de P - peuvent survivre sur les racines vivantes des arbres tandis qu'elles meurent chaque année avec les racines des végétaux des annuelles. Ces mycorhizes vivants peuvent coloniser rapidement les racines de toutes les plantes au début d'une prochaine saison humide. Cette colonisation se fait plus rapidement que lorsque les spores des mycorhizes doivent germer. De cette façon-là, l'absorption de P en début de saison humide peut être favorisée. Il n'est pas certain cependant que les mycorhizes survivront sur des racines pérennes, au cours d'une longue saison sèche (Thingstrup - commentaire personnel).

L'influence des arbres sur le microclimat, l'infiltration, l'évaporation et l'humidité du sol peut être aussi bien positive que négative. Bien que les espèces ligneuses accroissent généralement l'humidité, on suppose que la concurrence pour l'eau entre les arbres et la strate herbacée augmente lorsque l'on va vers des régions plus arides telles que le Sahel ([Breman & Kessler - 1995](#)).

L'influence exercée sur l'infiltration donnera généralement un sol plus humide, parce que i) l'intensité des pluies est normalement élevée et elles seront réduites sous les frondaisons basses, résultant en une infiltration supérieure, et ii) les vents violents accompagnant les pluies causent des pertes d'interception minimales.

L'influence de l'évapotranspiration peut donner une humidité du sol plus haute ou plus basse sous les frondaisons, du fait de la réduction de l'évaporation et de l'augmentation de la transpiration. Cependant, le rapport évaporation/transpiration sera inférieur sous les arbres (Young - 1991) et l'eau absorbée par l'arbre peut déjà avoir véhiculé du phosphate.

Même si ne survient que la redistribution d'eau (piégeage d'eau soufflée par le vent dans la frondaison, ou ruissellement pluvial) et que l'humidité absolue du sol ne change pas dans toute la région, la teneur en

humidité accrue sous l'arbre augmente la diffusion de P plus qu'elle ne la réduit en-dehors de l'arbre, puisque le coefficient de diffusion-fonction de la teneur en humidité est quadratique. L'effet se renforce même lorsque cette différence d'humidité du sol sous et en-dehors de l'arbre, survient respectivement au-dessus et au-dessous de $\pm 10/15\%$ (de Willigen & van Noordwijk - 1987). L'importance quantitative de ces mécanismes peut varier entre différentes espèces d'arbres.

Dans cette zone-là, la perte de P due à l'érosion est considérable (Veldkamp *et al.* - 1991). Ces pertes peuvent être diminuées par les arbres, réduisant la vitesse du vent, rendant le sol moins sensible à l'érosion par amélioration de sa structure via l'apport de matière organique, par formation d'une matrice racinaire toujours présente, en conservant le sol et en piégeant la poussière érodée quelque part ailleurs.

La récupération de l'engrais du P est réduite par les pertes d'érosion (et de lessivage), et l'adsorption/précipitation ([annexe 3](#)).

Les arbres peuvent diminuer les pertes d'érosion (et de lessivage) et augmenter par là même la récupération d'engrais. Les capacités d'adsorption et de précipitation sont déjà faibles, mais elles peuvent être réduites légèrement en présence d'un apport supérieur de matière organique par les arbres, augmentant ainsi légèrement la récupération d'engrais.

[Partie II: Chapitre 1-4](#)

[Partie II: Chapitre 5-7](#)

Rapports PSS N° 26 (Partie II: Chapitre 1, 2, 3 et 4)

Influence des arbres agroforestiers sur le sol et la strate herbacée du Sud du Sahel

(étude particulière du phosphore)

[Table de matières,](#)

[Partie I](#)

Deuxième partie :

Comparaison de six espèces d'arbres et leur influence sur l'efficience d'absorption des éléments nutritifs au sein du système herbe-sol

II.1. Introduction

Un système agroforestier avec des arbres, dans la zone Soudano-Sahélienne, est-il plus efficace dans l'utilisation des éléments nutritifs (et de l'eau) qu'un système sans arbres ? On répondra à cette question en examinant plusieurs propriétés de l'arbre, ainsi qu'en comparant le sol et la strate herbacée sous et en-dehors des arbres.

Plusieurs auteurs (Charreau & Vidal - 1965 ; Belsky *et al.* - 1989 ; Young - 1991 ; Rao & Coe - 1992 ; Grouzis *et al.* - 1993) font mention du fait que les différences en matière de fertilité du sol, de croissance des cultures ou des herbes peuvent être au mieux déterminées en comparant la zone située sous la frondaison de l'arbre par rapport à celle située hors de la frondaison. Elles présentent la plus grande des différences. Il se peut que de petites différences soient occultées par la variabilité du terrain, elle-même souvent plus grande que les différences provoquées par les arbres (Plice - 1934).

Néanmoins, hors de la frondaison ne signifie pas hors de l'influence de l'arbre. C'est tout particulièrement la compétition entre les racines des arbres et les racines des herbes et des cultures qui peut être considérable, et s'étendre sur une grande surface (Chin K. Ong *et al.* - 1992).

Les recherches sur les arbres agroforestiers de la zone Soudano-Sahélienne est faite le plus souvent sur *l'Acacia albida*, connu pour favoriser les conditions de croissance des végétaux qui lui sont associés. On sait peu de choses au sujet d'autres espèces et leur aptitude à soutenir la croissance végétale dans leur environnement proche.

Le secteur d'étude - la ferme de Niono - est situé dans la zone Sud du Sahel où les précipitations atteignent environ 500 mm par an. Ce secteur fait partie du delta fossilifère du Niger dont la topographie est plane, à l'exception de dunes d'une hauteur de 10 mètres max. . Cette zone est constituée de trois groupes de sol : les vallées argileuses peu élevées, les dunes de sable « hautes » et les secteurs riches en terreau assurant la transition entre les dunes de sable et les vallées argileuses. Le groupe sableux comprend d'anciennes dunes aplanies et de jeunes dunes aux formes distinctes, avec entre les deux des dépressions.

Les sols du groupe sableux sont sableux avec, dans la fraction argileuse, principalement de la kaolinite et très peu d'illite et de smectite. L'argile est quelque peu lessivée dans le profil, sauf là où une croûte argileuse recouvre la surface.

La saturation de la base est presque toujours supérieure à 50 %. Une autre partie du complexe d'adsorption est occupée par

des polymères Al et Fe. Des oxydes de fer libres sont également répartis de façon égale sur les profils, en tant que fer amorphe - représenté par une couleur de matrice orange-brune - ou sont concentrés en latérite, que l'on peut trouver aussi dans ce secteur. Le pH est d'environ 5 ([Soumaré et al. - 1993](#)).

Ces dépôts sableux éoliens semblent pouvoir être comparés à des sols les uns à la suite des autres, entre des sols ferrugineux et des sols bruns et bruns-roux ([annexe 1](#)).

La végétation de cette zone est constituée d'arbres dispersées sur les dunes de sable - les versants limoneux ont peu de végétaux en raison du ruissellement pluvial et de l'érosion ; on trouve dans les vallées argileuses une concentration d'arbres et d'arbrisseaux, avec ruissellement et concentration d'eau et de éléments nutritifs. Les arbres sont petits (hauteur : < 5 m), particulièrement sur les dunes de sable, et leur couverture est d'environ 10 %, s'élevant jusqu'à 30-50 % dans les vallées. Espèces dominantes : *Sclerocarya birrea* - *Acacia seyal* - *Acacia senegal* - *Zizyphus mauritiana* - *Balanites aegyptiaca* - *Commiphora africana* - *Combretum* et *Guiera senegalensis*. La strate herbacée, jadis composée d'espèces simplement pérennes (*Andropogon*), est constituée d'espèces annuelles, ceci étant principalement dû aux précipitations en diminution au cours des dernières décennies. La couverture est d'environ 40 %, et la biomasse herbacée peut faire varier le facteur 2 selon la distribution des précipitations. Quelques-unes des espèces dominantes sont : *Schoenefeldia gracilis*, *Cenchrus biflorus* et *Indigofera prieuriana*.

La biomasse totale de la végétation est de 1000/3000 kg/ha ([Penning de Vries & Djiteye - 1991](#)).

Bien que la ferme même est/était peu ou prou protégée, l'aménagement de l'espace rural a conduit à une dégradation de celui-ci, ce qui est un fait commun dans la région, du fait d'un potentiel de production en diminution accompagné de pluies décroissantes, de la présence basse de éléments nutritifs en général, et de la pression accrue de l'aménagement de l'espace rural (pastoralisme et un peu d'agriculture) par la population toujours croissante. L'utilisation des engrais est limitée aux rizières irriguées.

Six espèces communes du Sud du Sahel ont été choisies pour cette étude : 1) *Acacia senegal*, 2) *Acacia seyal*, 3) *Sclerocarya birrea*, 4) *Balanites aegyptiaca*, 5) *Combretum ghasalense* et 6) *Commiphora africana*. Les méthodes d'investigation de leur influence sur la présence et l'absorption de éléments nutritifs sont :

- 1) analyse des propriétés chimiques du sol
- 2) détermination des quantités et fractions de matière organique grossière du sol
- 3) détermination de la biomasse herbacée et de sa teneur en phosphore et azote
- 4) mesures de l'humidité du sol. Celles-ci sont faites sous et en-dehors des frondaisons
- 5) les systèmes racinaires structuraux sont déterrés afin d'évaluer s'il y a : i) concurrence par les racines d'arbre ; ii) redistribution des éléments nutritifs vers la zone située sous les frondaisons.
- 6) la décomposition de la litière de feuillages et de branchages est contrôlée - les teneurs en P et N sont analysées pour évaluer les différences dans la dynamique de la matière organique, et le cycle nutritif parmi les différentes espèces.

D'autres facteurs variables tels que les sols, la position topographique etc. peuvent influencer l'effet net d'un arbre. Afin d'éviter de me perdre au coeur de variables trop nombreuses, j'ai sélectionné mes arbres sur les dunes sableuses de la ferme de Niono, en supposant que les sols sableux pauvres - par dérivation du terminal continental ou suite aux dépôts du vent - sont des sols dominants dans la zone du Sud du Sahel (Jones & Wild - 1975).

II.2. Comparaison des propriétés chimiques du sol (sous et en-dehors des frondaisons)

II.2.1. Introduction

Le fait que la fertilité du sol soit supérieure sous des arbres isolés est un phénomène général (Charreau & Vidal - 1965 ; Gerakis & Tsangarakis - 1970 ; Gerspier & Holowaychak - 1971 ; Belsky *et al.* - 1989 ; Brouwer *et al.* - 1991 ; [Breman & Kessler - 1995](#)).

L'étude du sol qui suit visait à constater si, sur les sols sableux de la zone du Sud du Sahel, la fertilité du sol est supérieure sous les arbres par comparaison à la zone extérieure correspondante, et si elle diffère parmi ces six espèces. Des échantillons de sol ont donc été prélevés sous et en-dehors de trois arbres adultes de chacune des espèces. On a déterminé le pH, la CEC, la texture et les teneurs en C organique, phosphore, azote et bases.

Bien que la fertilité accrue du sol sous les arbres isolés est un phénomène général, ceci ne signifie pas pour autant que les arbres améliorent automatiquement la fertilité du sol. En effet, l'autre possibilité est que les arbres se fixent par sélection en des lieux où la fertilité du sol est supérieure (Brouwer *et al.* - 1991 ; [Breman & Kessler - 1995](#)). La vérité concernant la fertilité du sol accrue sous les arbres - par comparaison à l'extérieur - peut se situer entre les deux ; une fois que les arbres se sont établis en des lieux quelque peu plus fertiles, ce sont eux qui peuvent alors favoriser la fertilité du sol.

On dit souvent que l'enrichissement des sols par les arbres augmente avec l'âge. Au début, l'arbre utilise principalement les éléments nutritifs de la couche supérieure du sol - ultérieurement, l'ajout ultérieur de litière à la surface du sol dépasse la quantité de éléments nutritifs absorbée par l'arbre (Nye & Greenland - 1960 ; [Breman & Kessler - 1995](#)). Dans les régions arides, l'enrichissement sera principalement limité à la surface du sol ; il se fixera plus rapidement sur les terres fertiles que sur les dunes sableuses peu fertiles.

Les processus par lesquels les arbres peuvent accroître la fertilité du sol sous les frondaisons sont : 1) des dépôts secs et humides (éléments nutritifs, argile), 2) une érosion, lessivage et ruissellement pluvial décroissante, 3) l'absorption et le recyclage des éléments nutritifs, 4) la fixation d'azote, 5) une légère réduction de l'acidité par des ajouts de bases dans la litière d'arbre, 6) l'apport de différentes qualités de litière, 7) la concentration de crottes d'animaux, 8) l'amélioration des propriétés physiques du sol (Young - 1991 ; [Breman & Kessler - 1995](#)).

Dans les sols dépourvus de ressources en profondeur, l'enrichissement du sol sous les arbres se fera principalement aux dépens de la zone entourant l'arbre.

La fixation d'azote est très limitée dans les environnements arides et pauvres en phosphore. L'amélioration des propriétés physiques du sol par des activités biologiques accrues, un meilleur enracinement et des apports en matière organique peut constituer un critère important (Young - 1991) - mais cette étude vise simplement à examiner les propriétés chimiques et la texture du sol.

II.2.2. Matériels et méthodes

Pour étudier l'influence des arbres sur la fertilité du sol, des échantillons des sols se trouvant sous et en-dehors des six espèces d'arbres ont été prélevés et analysés.

Les prélèvements des sols ont été réalisés en utilisant une tarière Edelman, sur trois différentes profondeurs : 0-20 cm, 20-50 cm et 50-100 cm. Le positionnement des échantillons était comme indiqué à la figure II.2.1.

Tous les échantillons d'une même couche sous le houppier de l'arbre (rayon : 1/6, 3/6, 5/6) ont été mélangés de même que tous les échantillons d'une même couche hors de le houppier de l'arbre (r : 2, 3) ont été mélangés, ce qui a donné 6 échantillons par arbre, avec répétition des trois arbres par espèce.

[Figure II.2.1.](#) Points d'échantillonnage sous et en-dehors de la frondaison.
(tree-crown = cime de l'arbre)

II.2.3. Résultats

Les résultats des analyses de sol sont indiqués au tableau II.2.1 a-g. Généralement parlant, les différences concernant les caractéristiques chimiques du sol sous et en-dehors des arbres ne sont ni grandes ni conséquentes.

Texture

En général, la couche supérieure contient moins d'argile et plus de sable que les deux strates plus profondes.

Il n'existe pas de différence conséquente entre les teneurs en argile sous les arbres par rapport à l'extérieur des arbres.

Carbone organique

En général, les teneurs en carbone organique sont très faibles, et elles diminuent en profondeur.

Sclerocarya birrea : les teneurs en carbone organique des deux premières strates sous l'arbre sont plus faibles qu'à l'extérieur de l'arbre.

Combretum ghasalense : les teneurs en carbone organique des deux premières strates sont supérieures sous l'arbre, par rapport à l'extérieur de l'arbre.

Balanites aegyptiaca : les teneurs en carbone organique sont quelque peu supérieures sous le Bal1 et Bal3, et inférieures sous le Bal2, par rapport à l'extérieur des arbres.

Acacia senegal - *Commiphora africana* et *Acacia seyal* : il n'y a pas de différence importante et conséquente au niveau de la teneur en matière organique sous et en-dehors des arbres.

CEC

Dans tous les cas, la CEC augmente à partir de la strate 1 (0-20 cm) jusqu'à la strate 2 (20-50 cm). Cette tendance est parallèle à une augmentation de la teneur argileuse, et parfois, à une réduction de la teneur en matière organique. A partir de la seconde jusqu'à la troisième strate, la CEC diminue à nouveau fréquemment, parallèlement à une réduction de la teneur en carbone organique tandis que la teneur en argile demeure à peu près la même.

Lorsqu'on compare la CEC sous les arbres à la CEC à l'extérieur des arbres, il n'y a pas en général d'augmentation ou de réduction nette. Il semble cependant qu'il y ait une différence d'impact entre les espèces d'arbres :

Combretum ghasalense : la CEC sous les arbres est toujours légèrement supérieure sous les arbres par rapport à l'extérieur, avec un facteur d'accroissement moyen de 1,14 ((sous l'arbre/en-dehors de l'arbre) / n). Ce facteur diffère nettement entre chacun des arbres de cette espèce.

Sclerocarya birrea : la CEC sous les arbres est toujours égale ou supérieure à celle en-dehors des arbres, avec un facteur d'accroissement moyen de 1,12.

Acacia seyal : pour deux arbres (ASy1 et ASy3), la CEC est supérieure sous les arbres par rapport à l'extérieur des arbres (facteur d'accroissement : 1,20) - pour le troisième arbre (Asy2), elle est inférieure (facteur de décroissement : 0,84).

Balanites aegyptiaca, *Acacia senegal*, *Commiphora africana* : la CEC sous les arbres n'est pas supérieure ou inférieure par

rapport à l'extérieur des arbres. Il existe des différences d'augmentation ou de diminution, soit parmi les diverses couches (Balanites) ou parmi les différents arbres d'une seule espèce (Commiphora). Néanmoins, les facteurs moyens entre la CEC sous les arbres, par comparaison à l'extérieur des arbres, est toujours supérieure à 1 : Balanites : 1,08 - Commiphora : 1,04 et Acacia : 1,01.

Mg + Ca : saturation et teneur

Généralement, la saturation en Mg + Ca diminue avec la profondeur, à l'extérieur des arbres. Sous les arbres, l'évolution de la saturation Mg+Ca est variable sur la profondeur. A l'exception des profils conséquents du *Sclerocarya birrea* sous lequel la saturation Mg+Ca augmente quelque peu vers la seconde couche et décroît à nouveau vers la troisième couche pour la totalité des trois arbres, il n'existe pas de tendance logique de saturation Mg+Ca croissante ou décroissante sur la profondeur, pour les autres espèces ; cela varie d'un arbre à l'autre au sein d'une espèce.

Pour comparer la teneur de base sous et en-dehors des arbres, je préfère considérer le total de Ca+Mg (et ultérieurement par rapport au pH).

A nouveau, le fait qu'il y ait une augmentation du Mg+Ca total sous l'arbre, par comparaison à l'extérieur, est plus important parmi chacun des arbres ou parmi les couches associées au même arbre, qu'entre les espèces.

Acacia senegal : dans la plupart des cas, la teneur en Mg+Ca est plus élevée sous l'arbre qu'à l'extérieur - sans comparaison avec la CEC qui était à peu près la même sous et à l'extérieur des arbres.

Acacia seyal : les deux arbres Asy1 et Asy3 présentent un volume de Mg+Ca supérieur sous l'arbre qu'à l'extérieur alors que c'est le contraire pour Asy2. Ceci équivaut aux différences de CEC.

Combretum ghasalense : un arbre principalement (le CbG1) présente une quantité de Mg+Ca beaucoup plus importante sous l'arbre qu'à l'extérieur. En ce qui concerne les deux autres arbres, il y a pratiquement pas de différence - autrement qu'en cas de la CEC.

Balanites aegyptiaca : le volume de Mg+Ca est inférieur sous les arbres, par rapport à l'extérieur, alors que la CEC était à peu près la même.

Commiphora africana et *Sclerocarya birrea* : la teneur en Mg+Ca sous les arbres est parfois inférieure, parfois supérieure, par rapport à l'extérieur, variant principalement d'un arbre à un autre pour le Commiphora, et d'une couche à l'autre pour le Sclerocarya. Le processus évolue à peu près de la même façon que pour la CEC.

pH-H₂O, pH-KCL et [delta]pH

A l'extérieur des arbres, le pH-H₂O diminue toujours de la première à la seconde couche. Pour la moitié des déterminations, il croît à nouveau en direction de la seconde strate. Le pH-KCL décroît sur la profondeur - parfois principalement de la première à la seconde couche, parfois principalement de la seconde à la troisième couche. Sous les arbres, le pH-H₂O varie un peu plus mais ne s'atténue pas fortement et de façon conséquente par rapport à l'extérieur des arbres. Le pH-KCL décroît sur la profondeur, de même qu'à l'extérieur des arbres.

Acacia senegal : le pH-H₂O est à peu près identique sous les arbres, et à l'extérieur. Le pH-KCL est souvent un peu supérieur sous les arbres par rapport à l'extérieur, ce qui signifie que le [delta]pH est plus faible sous l'arbre qu'à l'extérieur.

Acacia seyal : le pH-H₂O est un peu plus élevé sous les arbres qu'à l'extérieur (différence moyenne de l'unité pH : 0,24). Le pH-KCL est environ le même sous les arbres et en-dehors, résultant en un [delta]pH plus grand sous l'arbre qu'à l'extérieur.

Combretum ghasalense : le pH-H₂O ne présente pas de différences conséquentes sous et en-dehors des arbres. Le pH-KCL est souvent quelque peu plus élevé sous l'arbre qu'à l'extérieur, de telle sorte que le [delta]pH est plus faible sous l'arbre qu'à l'extérieur.

Balanites aegyptiaca : le pH-H₂O est quelque peu plus faible sous les arbres qu'à l'extérieur, tout particulièrement dans les 2ème et 3ème couches. Le pH-KCl est à peu près identique, ce qui signifie que le [delta]pH est plus faible sous l'arbre qu'à l'extérieur.

Sclerocarya birrea : le pH-H₂O est plus élevé sous l'arbre qu'à l'extérieur, tout particulièrement pour la première couche. Le pH-KCL est quelque peu plus élevé sous l'arbre, pour toutes les couches, de telle sorte que le [delta]pH est plus faible sous l'arbre qu'à l'extérieur.

Commiphora africana : il n'existe pas de différence conséquente entre le pH- H₂O, le pH-KCL et le [delta]pH sous et en-dehors des arbres. Les principales différences se situent entre chacun des arbres.

Azote :

La précision des déterminations d'azote est faible - rien ne peut amener à conclure que la teneur en azote des sols est très basse en général.

Phosphore :

Dans certains sites, le P_{total} augmente sur la profondeur - dans d'autres, il demeure égal. Les corrélations entre le pourcentage de P_{ass} et le pourcentage de C organique, et entre le P_{ass} et le pourcentage de C organique sont faibles.

Acacia senegal : sous les arbres, la teneur en P_{total} de la première couche est plus élevée qu'à l'extérieur. Sous l'arbre, P_{ass} est beaucoup plus élevé qu'à l'extérieur de l'arbre, avec - dans la première couche - des facteurs de divergence de 5,2, 2,6 et 2,2 respectivement, et - dans les 2ème et 3ème couches - une hausse moyenne de 1,35 et 1,17 respectivement.

Le pourcentage de P_{total} qui est P_{ass} (P_{ass} %) est plus élevé sous l'arbre qu'à l'extérieur, tout particulièrement dans la première couche.

Acacia seyal : il n'y a aucune de différence de P_{total} sous et à l'extérieur des arbres. Pour toutes les strates de Asy1 et Asy3, P_{ass} est plus élevé sous l'arbre qu'à l'extérieur, et est environ identique ou inférieur pour le Asy2. Ceci signifie que pour Asy1 et Asy3, P_{ass} % est plus élevé sous les arbres qu'à l'extérieur (en moyenne 2,1 fois supérieur). Pour ASy2, il est légèrement inférieur sous l'arbre par rapport à l'extérieur (1,1 fois inférieur).

Sclerocarya birrea : en ce qui concerne le P_{total}, il n'y a pas de différence importante sous et en-dehors des trois arbres. P_{ass} est souvent légèrement supérieur sous les arbres qu'à l'extérieur. Donc, P_{ass} % est légèrement supérieur (1,3 ; non utilisé : ScB1 20-50 cm et ScB2 50-100 cm) sous les arbres par rapport à l'extérieur. Il y a une grande variabilité dans l'impact qu'ont les différents arbres de cette espèce.

Balanites aegyptiaca : il n'y a pas de différence importante entre P_{total} sous les arbres et à l'extérieur. Sous Bal1 (dans une

zone avec des teneurs en P relativement élevées), le P_{ass} est considérablement inférieur pour la totalité des 3 couches, par rapport à l'extérieur de l'arbre. Pour Bal2 et Bal3 (avec des teneurs en P relativement plus faibles pour cette zone), le P_{ass} est considérablement supérieur sous l'arbre par rapport à l'extérieur, tout particulièrement pour la première couche (respectivement 3,1 et 3,1 fois) (dans les seconde et troisième couches : respectivement 1,5 et 1,3 fois).

Pour Bal2 et Bal3, P_{ass} % est trois fois plus élevé dans la première couche sous l'arbre, comparativement à l'extérieur - et 1,4 fois plus élevé en moyenne pour les autres couches. Même pour Bal1, ce pourcentage est légèrement supérieur pour la première couche sous l'arbre, comparativement à l'extérieur.

Combretum ghasalense : P_{total} est un peu supérieur sous deux des arbres, par rapport à l'extérieur. Le P_{ass} est plus élevé sous les arbres qu'à l'extérieur pour la totalité des 3 arbres, particulièrement dans les premières couches.

Le P_{ass} % est supérieur sous tous les arbres, particulièrement pour les deux premières couches (en moyenne : 1,6 et 1,5 fois respectivement plus élevé sous les arbres).

Commiphora africana : il y a souvent plus de P_{total} dans la première couche sous les arbres, et moins dans les couches plus profondes, comparativement à l'extérieur des arbres. Il en va de même pour P_{ass} . En ce qui concerne P_{ass} %, il n'y a pas de grandes différences sous et en-dehors des arbres. Ce pourcentage est quelque peu plus élevé pour la première couche, quelque peu plus basse pour les couches plus profondes sous l'arbre, comparativement à l'extérieur.

Tableau II.2.2 : Facteur d'accroissement entre P_{ass} sous l'arbre, par rapport à l'extérieur.

espèce	facteur d'accroissement	caractéristique
A. senegal	2,4*	première couche (strate)
A. seyal	2,1**	toutes les couches
S. birrea	1,3**	toutes les couches
B. aegyptiaca	3,1*	première couche
	1,4*	autres couches
C. ghasalense	1,5	2 premières couches
C. africana	---	---

* un arbre exceptionnel non inclus

** forte variabilité entre les arbres.

II.2.4. Discussion

CEC, matière organique et texture

Aucune tendance générale ne semble se dessiner, en ce qui concerne des teneurs de carbone organique plus élevées sous les arbres qu'à l'extérieur.

L'une des raisons potentielles réside dans le fait que la capacité d'un arbre à fournir de la matière augmentant la teneur en matière organique du sol surpasse la capacité de stabilisation des sols sableux. Même des molécules complexes de matière organique du sol subiront une décomposition si elles ne forment pas des complexes avec des minéraux du sol, et reçoivent

ainsi une protection physique/colloïdale. Ces complexation et protection sont réalisées principalement grâce à des minéraux argileux grossiers (Coleman *et al.* - 1989). Nos sols sableux pauvres contiennent très peu d'argile et ce n'est principalement que de la fine kaolinite. Il n'y a cependant pas de relation bien établie entre la fraction d'argile et le C organique total - la corrélation est absente ou même négative et cette explication ne tient donc pas.

Une autre raison peut résider dans le fait que l'arbre fournit trop peu de matière organique pour augmenter les quantités de matière organique du sol, dans des proportions que l'on puisse déceler. Lorsque l'on calcule la différence pouvant exister entre la teneur en matière organique sous un arbre moyen, par rapport à l'extérieur, cette différence atteint au maximum 0,1 % de C organique au bout de 15 ans (calcul - [annexe 4](#)).

Cette différence n'apparaît pas non plus dans les résultats, pour les raisons suivantes :

- 1) la litière de terre en surface ne reste pas sous la frondaison - elle est transportée par le vent (ou par les animaux), accroissant l'ajout de C organique à l'extérieur de l'arbre tandis qu'elle réduit l'ajout de C organique sous celui-ci, amenuisant ainsi la différence.
- 2) la litière de racine d'arbre se trouve également dans la zone d'échantillonnage située à l'extérieur de l'arbre, amenuisant la différence entre la matière organique du sol sous l'arbre, et à l'extérieur.
- 3) la détermination de la matière organique du sol par embrasement de seulement 10 g de sol échantillonné a une précision trop faible, et les résultats ne sont pas fiables. Les valeurs de C organique, déterminées par deux fois sur certains échantillons, diffèrent largement (chapitre II.3 - tableau II.3.5)
- 4) la décomposition de la litière et de la matière organique du sol peut être accrue ou prolongée par des sols plus humides sous les arbres, or par une qualité de litière différente (chapitre II.3). Ceci peut contrebalancer les effets des quantités supérieures.

La capacité d'échange de cation est fixée par la teneur et la nature des minéraux argileux, la teneur en matière organique et les sesquioxydes. Dans les sols roux et bruns-roux - tels que définis par Jones & Wild (1976) ([annexe 1](#)) auxquels nos sols appartiennent -, les sesquioxydes ne jouent pas un rôle important. Par ailleurs, le pH de nos sols est trop faible pour que les sesquioxydes puissent exposer une charge de surface négative (1ère partie - chapitre II.3).

La CEC de la matière organique est d'environ 180 meq/100 g de sol sec à un pH de 5, et s'accroît de 30 meq par unité de pH en augmentation (moins dans des conditions naturelles) (Coleman *et al.* - 1989). Le pH des sols analysés est de 5-6, ce qui signifie que chaque pourcentage de matière organique contribue à la CEC à hauteur de 1,8 à 2,1 meq. Etant donné que la matière organique est : C organique/0,58, chaque pourcentage de C organique contribue à la CEC à hauteur de 3,1 à 3,6 meq.

La fraction argileuse de ces sols-là est constituée principalement de kaolinite ([Penning de Vries & Djiteye - 1991](#)). La CEC de la kaolinite est de 0,03-0,15 meq/g (Sanchez - 1976).

La matière organique et argileuse déterminant ainsi la CEC conduit à l'équation suivante :

$$(1) \text{ CEC} = 3,1 - 3,6 * \% \text{ C org.} + 0,03 - 0,15 * \% \text{ argile}$$

La teneur maximale en C organique est de 0,3 %, ajoutant au maximum 1,1 meq à la CEC.

Les teneurs en argile se situent entre 3 et 13 %, ajoutant 0,1 à 1,95 meq à la CEC - probablement un peu plus - parce qu'il peut y avoir présence de smectite et d'illite.

L'importance de l'argile dans la détermination de la CEC devrait être plus conséquente, par rapport à l'importance de la matière organique. Dans la couche supérieure, la teneur en matière organique doit être relativement grande puisque les teneurs en argile sont inférieures et les teneurs en matière organique supérieures au reste de la colonne du sol. Il n'y a cependant pas de corrélation (-0,099) entre la CEC et le % de C organique dans la couche supérieure. La régression multiple

conduit à l'équation suivante :

$$(2) \text{ CEC} = 1,2 * \% \text{ C org.} + 0,26 * \% \text{ argile} + 0,01 \text{ (R}^2 = 0,429\text{)}$$

Cette équation se rapproche quelque peu de l'équation hypothétique (1), bien que l'argile ajoute plus, et la matière organique moins à la CEC que dans la situation d'hypothèse. Cette déviation peut être due à :

- 1) plus d'argile non kaolinitique avec une CEC/g supérieure
- 2) des valeurs élevées de CEC peu réalistes, en raison d'une détermination à un pH de 7 au lieu d'un pH de 5-6 dans des conditions naturelles,
- 3) des déterminations de matière organique peu fiables,
- 4) présence de matière organique « inerte » due à la faible capacité de décomposition des matières organiques dans des environnements pauvres en élément nutritive.

Si l'on prend les résultats de toutes les couches, on obtient l'équation suivante :

$$(3) \text{ CEC} = 0,57 * \% \text{ C org.} + 0,18 * \% \text{ argile} + 0,66 \text{ (R}^2 = 0,371\text{)}$$

avec les corrélations suivantes :

$$\text{CEC} - \% \text{ argile} = 0,608$$

$$\text{CEC} - \% \text{ C org.} = - 0,261$$

$$\text{CEC} - \% \text{ C} - \% \text{ argile} = - 0,498$$

On s'écarte ainsi d'autant plus de l'équation hypothétique (1), en particulier pour le C organique. L'argile apparaît comme le principal déterminant.

L'évolution de la CEC sur la profondeur semble en effet pouvoir s'expliquer par des modifications dans l'argile ; et même lorsqu'on retire de la CEC $0,2 * \% \text{ argile}$, la CEC résiduelle restante ne correspond pas aux teneurs en matière organique (0,107 respectivement) : augmentation de la couche 1 à la couche 2 avec une teneur en argile s'accroissant brusquement, et une teneur en C organique sans modifications importantes. La CEC diminue un peu en direction de la troisième couche tandis que la teneur en argile demeure identique et que la teneur en matière organique décroît. D'autres profils de CEC apparaissent - ils peuvent s'expliquer aussi en tant qu'accompagnement des profils de teneurs en argile et matière organique.

Combretum ghasalense : les teneurs supérieures en C organique peuvent être dues au fait que la litière de feuilles demeure probablement en grande partie sous la frondaison de cette espèce d'arbre. Les feuilles sont larges et ne peuvent pas être aisément enlevées par le vent, comme c'est le cas pour les autres espèces. Que la CEC soit plus élevée sous les arbres peut être dû aux teneurs supérieures en matière organique dans les deux premières strates, comparativement à l'extérieur des arbres.

Sclerocarya birrea : bien que la teneur en carbone organique soit quelque peu inférieure sous les arbres, la CEC est un peu supérieure tandis que la teneur en argile est à peu près la même. Ces faibles différences peuvent occulter les relations, ou bien la nature de la matière organique sous l'arbre est différente de l'extérieur, et a une CEC supérieure par gramme. Nous discuterons de cette possibilité au chapitre II.3.

Acacia seyal : le fait que la CEC est plus élevée sous deux des arbres ne peut pas s'expliquer par des teneurs supérieures en matière organique ou argile. Ceci est probablement dû également à la nature de la matière organique.

Balanites aegyptiaca : la CEC n'est pas notoirement supérieure sous l'arbre, par rapport à l'extérieur : elle est identique et se situe en parallèle à la teneur en matière organique, ce qui peut expliquer l'absence d'effet.

Acacia senegal et *Commiphora Africana* : ni la CEC, ni la teneur en argile ou en matière organique ne sont régulièrement différentes sous les arbres et en-dehors.

pH et saturation de la base

Des analyses précédemment réalisées au « Laboratoire des sols » (Sotuba) ont amené à la conclusion suivant laquelle la détermination de saturation de la base n'est pas fiable (souvent bien au-delà de 100 %) - seuls les Mg et Ca sont déterminés pour avoir une idée de l'ampleur de la saturation de la base. La teneur en Mg+Ca est comparée avec le pH, en tant qu'autre indicateur de la saturation de la base. Un pH supérieur signifie qu'une quantité supérieure de H^+ (ou probablement de polymères Al et Fe) est absorbée sur la CEC. Lorsque le pH augmente, soit la saturation de la base décroît dans l'hypothèse d'une CEC égale, soit la CEC est plus élevée et la saturation de base peut être quelque peu supérieure ou inférieure, ou bien identique.

Le pH généralement supérieur à la surface du sol peut être dû au fait que les bases fournies par la litière s'accumulent d'abord à la surface du sol sous forme de cations libres, avant de s'enfoncer dans le profil et d'être adsorbées.

Influence des arbres

Acacia senegal : l'acidité totale - comme indiqué par pH-KCL sous les arbres - y est moins élevée qu'à l'extérieur. Le pH- H_2O est plus élevé sous l'arbre qu'à l'extérieur, indiquant qu'une part plus grande de l'acidité totale est absorbée sur la CEC, sous les arbres. Sous les arbres et en-dehors, la CEC est à peu près la même - conséquemment, la saturation de la base sous l'arbre devrait être supérieure. Des teneurs en Ca+Mg supérieures sous les arbres, par rapport à l'extérieur, confirment ceci.

Acacia seyal : l'acidité totale sous les arbres et en-dehors est à peu près la même. Le pH- H_2O est plus élevé sous l'arbre qu'à l'extérieur, indiquant qu'une part plus grande du H^+ total est absorbée sur la CEC. La CEC de ASy1 et Asy3 est considérablement plus élevée sous les arbres, de telle sorte qu'il n'est pas nécessaire que la saturation de base soit inférieure bien qu'une quantité plus grande de H^+ est absorbée. Les résultats de Mg+Ca montrent en effet qu'il y en a toujours plus sous l'arbre qu'à l'extérieur. Pour Asy2, les différences entre le dessous et l'extérieur de l'arbre sont si minces que l'interprétation est difficile.

Combretum ghasalense : l'acidité totale sous l'arbre est un peu faible par rapport à l'extérieur. Du fait d'une CEC supérieure, le taux de base adsorbé sous les arbres devrait être également supérieur, tout particulièrement pour Cb1. Les résultats de la teneur en Mg+Ca confirment ceci pour cet arbre. Pour les autres arbres, les résultats du pH et teneur en Ca+Mg sont plus paradoxaux.

Balanites aegyptiaca : sous les arbres, l'acidité totale est à peu près la même qu'à l'extérieur. Le pH- H_2O inférieur indique qu'une quantité plus faible de H^+ est adsorbée sur la CEC, sous l'arbre. Dans certains cas, la CEC est légèrement supérieure. Ceci pourrait indiquer que la base de la saturation et le volume total des bases seraient plus élevés sous les arbres. Pourtant, la teneur en Ca+Mg est plus faible sous l'arbre qu'à l'extérieur. Il se peut que les Ca et Mg à l'extérieur des arbres existent sous d'autres formes (précipitations) - par conséquent, la teneur totale sous l'arbre peut être moindre (environnement humide), mais la quantité adsorbée sur la CEC peut être supérieure. Cela pourrait expliquer également que les valeurs de saturation Mg+Ca sont > 100 % dans la première couche, en-dehors de Bal2 et Bal3.

Sclerocarya birrea : l'acidité totale est plus faible sous les arbres qu'à l'extérieur mais la part d'acidité absorbée sur la CEC (comme indiqué par pH) diffère. Ceci se reflète dans les teneurs en Mg+Ca des sols et de la saturation Mg+Ca qui ne présentent pas de différence conséquente sous et en-dehors des arbres.

Commiphora africana : l'acidité totale est à peu près égale sous et en-dehors des arbres. Pour les arbres 2 et 3, le pH- H_2O des deux premières couches est plus élevé en-dehors des arbres - ainsi, pour ces sols-là, une part plus importante de H^+ est

adsorbée sur la CEC. Etant donné que la CEC est à peu près égale ou même sensiblement inférieure en-dehors des arbres - pour ces couches-là -, la saturation de la base doit être considérablement moindre. Les mesures de teneur Mg+Ca ne confirment pas ce fait, probablement pour les mêmes raisons que celles indiquées ci-dessus pour les *Balanites* ou bien parce que les différences sont trop faibles (et les erreurs de détermination trop grandes) pour l'évaluer à bon escient.

Le fait que l'acidité totale sous les arbres est souvent un peu plus basse peut être attribué aux ajouts de bases dans la litière d'arbre (Young - 1991). Il m'est impossible d'expliquer toutes les autres légères différences pouvant être provoquées également par le facteur global de variabilité. Il est difficile de conclure quoique ce soit au sujet de l'influence qu'exercent les arbres sur la saturation de la base, puisque ces différences sont moindres et peuvent être occultées par la faible précision des analyses.

Phosphore

La différence des profils de P_{total} en général est due à la variabilité du terrain des dépôts éoliens.

Le P_{total} supérieur des premières couches principalement, sous *l'Acacia senegal*, le *Combretum ghasalense* et le *Commiphora africana*, peut être dû au recyclage du phosphore à partir de la colonne de sol complètement enracinée, via la litière jusqu'à la surface. Dans la litière de bois, la teneur en P est au plus haut pour les *Commiphora* et *Combretum* (basse pour l'*A. senegal*). Malheureusement, la teneur en P des litières de feuilles ne peut pas supporter la comparaison étant donné que l'analyse n'est pas fiable (comme l'ont démontré les analyses répétées des litières de branches). Les arbres paraissent avoir une influence beaucoup plus importante sur la disponibilité en phosphore, bien qu'une différence existe entre les espèces, de l'influence presque inexistante du *Commiphora africana* jusqu'à des teneurs en P disponible beaucoup plus élevées sous les *Acacias* et sous deux pieds de *Balanites aegyptiaca*.

L'accroissement du P disponible (P_{ass}) sous les arbres - par comparaison à l'extérieur - ne semble pas être lié à la teneur en matière organique (respectivement -0,340 à 0,293 pour les différentes couches, sous les arbres et en-dehors), ni au pH (0,152 respectivement). Cela peut être lié aux différences de : i) la nature de la matière organique, ii) l'action racinaire et iii) l'activité biologique sous les arbres, par comparaison à l'extérieur. Cela peut probablement influencer les formes sous lesquelles le phosphore est présent dans le sol.

II.2.5. Conclusion

Le tableau II.2.3 résume les effets qu'exercent les différents arbres sur les diverses propriétés chimiques du sol. Les arbres ont un impact - d'ampleur diversifiée - sur les propriétés chimiques des sols sableux de la zone du Sud du Sahel dont fait partie notre secteur de recherche.

Etant donné que les différences entre ce qui se passe sous les arbres et en-dehors sont souvent faibles, et que la variabilité du terrain est élevée, l'influence des arbres peut être largement occultée, comme l'indiquent les différences d'impact entre les arbres d'une même espèce.

Parmi toutes les propriétés chimiques examinées ici, l'influence principale des arbres se situe au niveau de la disponibilité du phosphore, bien qu'il existe de grandes différences entre les espèces, et entre les arbres d'une même espèce. La teneur totale en matière organique n'est pas liée à cette différence. L'explication possible peut résider dans le fait que les arbres fournissent une matière organique dont la nature est différente. Nous en discuterons dans le chapitre suivant.

L'azote n'est pas sujet au débat du fait du manque de précision de l'analyse. L'influence des arbres sur la CEC et l'acidité est aussi généralement positive bien que les différences par rapport à l'extérieur des arbres sont souvent très faibles. Les autres propriétés : teneur en carbone organique, saturation de la base et granulométrie présentent peu de différences, ou sinon inconséquentes.

L'espèce d'arbre présentant le plus faible impact sur les propriétés chimiques du sol est le *Commiphora africana*, tandis que les *Acacias* et le *Combretum ghasalense* démontrent l'effet le plus fort.

Tableau II.2.3 : Influence des espèces d'arbres sur les diverses propriétés chimiques du sol. (+ : légèrement positif, ++ : manifestation positif, - : légèrement négatif, +/- pour différents arbres de la même espèce).

	CEC	pH	saturation de la base	C organique	P
A. senegal		+	+		++
A. seyal	++/-	+	+/-		++
S. birrea	+	+		-	+
B. aegyptiaca		-	?	+/-	++/-
C. ghasalense	+	+	+	+	+
C. africana					+

Tableau II.2.1a : Analyse du sol sous et à l'extérieur de trois arbres de chaque espèce - trois couches (0-20 cm, 20-50 cm, 50-100 cm).

Acacia seyal																		
	1						2						3					
	sous l'arbre			à l'extérieur de l'arbre			sous l'arbre			à l'extérieur de l'arbre			sous l'arbre			à l'extérieur de l'arbre		
	0-20	-50	-100	0-20	-50	-100	0-20	-50	-100	0-20	-50	-100	0-20	-50	-100	0-20	-50	-100
pH-H ₂ O	5,50	5,26	5,56	5,46	4,93	4,87	6,18	5,70	5,20	6,06	5,57	5,39	5,63	5,73	7,20 ?	5,35	5,01	5,18
pH-KCl	4,17	3,80	3,82	4,03	3,78	3,71	5,03	4,28	3,99	4,99	4,33	4,11	4,52	3,74	3,80	4,05	3,80	3,68
pH	1,33	1,46	1,74	1,43	1,15	1,16	1,15	1,42	1,21	1,07	1,24	1,28	1,11	1,99		1,30	1,21	1,50
Ca	0,58	0,83	0,99	0,58	0,49	0,49	0,74	0,41		0,83	0,66	0,83	0,92	1,01	0,57	0,66	0,39	0,22
Mg	0,36	0,72	0,76	0,34	0,60	0,51	0,34	0,54	0,03	0,31	0,47	0,60	0,76	1,12	0,91	0,76	1,02	0,94
Mg +Ca	0,94	1,55	1,75	0,92	1,09	1,00	1,08	0,95		1,14	1,12	1,43	1,68	2,13	1,48	1,42	1,41	1,16
MCsat.	54,0	71,1	76,4	64,8	55,6	54,1	82,4	79,2		80,3	79,6	73,0	43,4	62,5	46,4	50,4	45,0	42,0
CEC	1,74	2,18	2,29	1,42	1,96	1,85	1,31	1,20	1,52	1,42	1,42	1,96	3,87	3,41	3,19	2,82	3,13	2,76
N tot.	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
P tot.	94	104	119	84	109	119	62,5	81	104	67,1	81	99,5	100	130	144	104	141	140
P _{ass}	5,53	4,66	4,95	2,04	2,04	2,91	4,66	3,19	5,53	4,66	4,08	5,53	9,18	7,7	28,7	3,85	6,51	12,73
% P _{ass}	5,88	4,48	4,16	2,43	1,87	2,44	7,46	3,94	5,32	6,96	5,04	5,56	9,18	5,92	19,9	3,70	4,62	9,09
C org.	0,28	0,24	0,23 ?	0,23	0,21	0,20	0,17 ?	0,32 ?	0,26 ?	0,32	0,34	0,24	0,24	0,23	0,12	0,29	0,16	0,06
gran	6,2	11,3	11,0	5,6	10,1	11,5	4,1	7,4	9,5	4,4	7,6	10,8	6,1	10,3	11,2	7,5	10,6	10,4

	l	6,7	7,8	5,5	5,5	5,6	6,0	6,9	5,6	5,4	8,6	5,3	6,9	11,4	9,4	9,8	11,2	11,6	7,9
	s	87,1	80,8	83,5	88,8	84,2	82,5	89,0	87,0	85,1	87,0	87,0	82,2	82,5	80,3	79,0	81,2	77,5	81,7

Mg, Ca, P_{total} et P_{ass} en mg / kg

MCsat = saturation Mg+Ca de la CEC en pourcentage

CEC en meq / 100 g - sol sec

C organique et N_{total} en pourcentage

granulométrie :

c = argile en %

l = limon en %

s = sable en %

Tableau II.2.1b : Analyse du sol sous et à l'extérieur de trois arbres de chaque espèce - trois couches (0-20 cm, 20-50 cm, 50-100 cm).

Acacia senegal																			
		1						2						3					
		sous l'arbre			à l'extérieur de l'arbre			sous l'arbre			à l'extérieur de l'arbre			sous l'arbre			à l'extérieur de l'arbre		
		0-20	-50	-100	0-20	-50	-100	0-20	-50	-100	0-20	-50	-100	0-20	-50	-100	0-20	-50	-100
pH-H ₂ O		4,94	4,83	5,07	5,20	4,80	4,97	5,30	4,80	5,24	5,60	5,32	5,63	5,60	5,24	5,40	5,45	4,91	5,41
pH-KCl		4,46	3,76	3,60	3,75	3,70	3,62	4,08	3,74	3,60	4,08	3,75	3,67	4,48	4,16	4,11	3,86	3,90	4,18
pH		0,48	1,07	1,47	1,45	1,10	1,35	1,22	1,06	1,64	1,52	1,57	1,96	1,12	1,08	1,29	1,59	1,01	1,23
Ca		1,45	0,92	0,48	1,01	1,01	0,66	1,10	0,92		1,01	0,66	0,57	1,28	1,10	0,48	0,92	0,66	0,39
Mg		0,84	1,31	0,90	0,89	1,44	1,12	0,74	1,12		0,71	1,05	0,94	1,29	1,68	1,32	0,99	1,29	1,22
Mg+Ca		2,29	2,23	1,38	1,90	2,45	1,78	1,84	2,04		1,72	1,71	1,51	2,57	2,78	1,80	1,91	1,95	1,61
MCsat.		97,0	64,3	47,8	73,6	74,5	62,0	82,1	76,3		91,0	48,4	44,3	84,8	74,1	51,0	64,7	48,3	49,2
CEC		2,36	3,47	2,89	2,58	3,29	2,87	2,24	3,03	3,41	1,89	3,53	3,41	3,03	3,76	3,53	2,95	4,04	3,27
N tot.		0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
P tot.		104	101	102	73	100	111	153	192	213	123	177	213	93	77	69	57	66	52
P _{ass}		13,9	4,74	4,44	2,66	2,96	3,85	29,0	13,32	32,86	11,25	11,54	28,71	3,85	2,66	1,78	1,78	2,07	1,48
% P _{ass}		13,4	4,69	4,35	3,64	2,96	3,47	18,95	6,94	15,40	9,15	6,52	13,47	4,14	3,45	2,58	3,12	3,13	2,85
C org.		0,28	0,18	0,16	0,25	0,27	0,15	0,31	0,19	0,22	0,30	0,21	0,06	0,25	0,24	0,25 ?	0,25	0,21	0,15
gran	c	6,0	10,5	10,5	7,6	11,5	11,0	6,1	12,2	12,2	5,6	10,3	12,2	7,4	11,0	11,1	8,2	11,7	11,2
	l	10,5	11,9	11,8	10,6	11,4	11,0	13,6	12,3	12,1	13,0	14,2	12,7	14,5	12,6	13,4	13,6	13,9	10,1
	s	83,5	77,5	77,7	81,8	77,1	78,0	80,3	75,5	75,7	81,4	75,5	75,1	78,0	76,4	75,4	78,1	74,3	78,7

Mg, Ca, P_{total} et P_{ass} en mg / kg

MCsat = saturation Mg+Ca de la CEC en pourcentage

CEC en meq / 100 g - sol sec

C organique et N_{total} en pourcentage

granulométrie :

c = argile en %

l = limon en %

s = sable en %

Tableau II.2.1c : Analyse du sol sous et à l'extérieur de trois arbres de chaque espèce - trois couches (0-20 cm, 20-50 cm, 50-100 cm).

Sclerocarrya birrea																			
		1						2						3					
		sous l'arbre			à l'extérieur de l'arbre			sous l'arbre			à l'extérieur de l'arbre			sous l'arbre			à l'extérieur de l'arbre		
		0-20	-50	-100	0-20	-50	-100	0-20	-50	-100	0-20	-50	-100	0-20	-50	-100	0-20	-50	-100
pH-H ₂ O		5,86	5,70	5,83	5,60	4,99	5,07	5,80	4,85	4,88	5,31	4,98	5,08	5,30	5,19	5,08	5,25	4,85	5,10
pH-KCl		4,66	4,65	4,34	4,03	3,88	3,73	3,93	3,87	3,82	3,95	3,80	3,70	4,32	4,00	3,85	3,95	3,88	3,81
pH		1,20	1,05	1,49	1,57	1,11	1,34	1,87	0,98	1,06	1,36	1,18	1,38	0,98	1,19	1,23	1,30	0,97	1,29
Ca		1,0	1,52	1,17	0,65	0,66	0,58	0,58	0,49	0,33	0,66	0,66	0,41	0,57	0,74	0,65	0,57	0,74	0,57
Mg		0,61	1,39	1,08	0,45	0,91	0,81	0,56	0,91	0,85	0,65	0,91	0,85	0,38	0,73	0,81	0,41	0,70	0,68
Mg+Ca		1,61	2,91	2,25	1,10	1,57	1,39	1,14	1,40	1,18	1,31	1,57	1,26	0,95	1,47	1,46	0,98	1,44	1,25
MCsat.		88,0	102 ?	85,6	87,3	65,4	63,8	47,5	55,8	45,2	66,8	57,7	48,3	69,3	71,4	70,9	86,9	74,2	64,4
CEC		1,83	2,85	2,63	1,26	2,40	2,18	2,40	2,51	2,61	1,96	2,72	2,61	1,37	2,06	2,06	1,37	1,94	1,94
N tot.		0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01			0,01	0,01	0,01	0,01
P tot.		70	89	84	60	65	65	84	89	104	89	94	99	75	84	99	75	89	89
P _{ass}		2,62	4,66	3,49	1,44	1,46	1,75	1,75	1,17	1,75	1,46	1,17	1,75	2,62	2,04	2,91	2,04	2,04	2,33
% P _{ass}		3,74	5,23	4,15	2,40	2,25	2,69	2,08	1,31	1,68	1,64	1,24	1,76	3,49	2,43	2,94	2,72	2,29	2,62
C org.		0,24	0,07	0,09	0,29	0,19	0,10	0,13	0,15	0,17	0,21	0,24	0,20	0,22	0,14	0,14	0,23	0,25	0,09
gran	c	5,9	10,8	11,1	5,3	9,4	10,1	8,0	11,9	12,9	7,8	12,4	12,7	5,7	10,4	11,4	5,8	10,3	11,4
	l	11,6	8,0	11,1	11,5	12,6	9,8	8,7	7,7	7,0	9,0	6,2	8,5	8,9	7,9	8,8	10,6	6,6	7,9
	s	82,5	81,1	77,8	83,2	78,0	80,1	83,3	80,4	80,1	83,2	81,4	72,7	85,4	81,7	79,8	83,6	83,1	80,6

Mg, Ca, P_{total} et P_{ass} en mg / kg

MCsat = saturation Mg+Ca de la CEC en pourcentage

CEC en meq / 100 g - sol sec

C organique et N_{total} en pourcentage

granulométrie :

c = argile en %

l = limon en %

s = sable en %

Tableau II.2.1d : Analyse du sol sous et à l'extérieur de trois arbres de chaque espèce - trois couches (0-20 cm, 20-50 cm, 50-100 cm).

Balanites aegyptiaca																			
		1						2						3					
		sous l'arbre			à l'extérieur de l'arbre			sous l'arbre			à l'extérieur de l'arbre			sous l'arbre			à l'extérieur de l'arbre		
		0-20	-50	-100	0-20	-50	-100	0-20	-50	-100	0-20	-50	-100	0-20	-50	-100	0-20	-50	-100
pH-H ₂ O		5,50	4,90	5,09	5,39	5,30	5,31	5,29	4,90	5,52	5,55	5,62	5,90	5,15	4,87	4,77	5,74	5,53	5,19
pH-KCl		4,43	3,85	3,58	3,96	3,66	3,57	4,46	3,86	3,71	4,09	3,86	3,89	4,02	3,92	3,94	4,35	4,01	3,70
pH		1,07	1,05	1,51	1,43	1,64	1,74	0,83	1,04	1,81	1,46	1,76	2,01	1,13	0,95	0,83	1,39	1,52	1,49
Ca		1,01	0,92	0,31	0,92	0,75	0,48	0,75	0,48	0,13	1,28	0,01 ?	0,75	0,75	0,92	1,28	1,01	0,84	0,39
Mg		0,64	1,39	0,75	0,82	1,24	0,77	0,82	1,81	0,33	1,31	1,89	1,26	0,39	0,90	1,61	0,64	1,35	1,12
Mg+Ca		1,65	2,31	1,06	1,74	1,99	1,25	1,57	2,29	0,46	2,59		2,01	1,14	1,82	2,89	1,65	2,19	1,51
MCsat.		60,2	47,8	31,3	64,9	60,3	42,1	60,9	69,6		106 ?		92,2	66,7	72,8	91,2	105 ?	86,2	58,1
CEC		2,74	4,83	3,39	2,68	3,30	2,97	2,58	3,29		2,44	3,45	2,18	1,71	2,5	3,17	1,57	2,54	2,60
N tot.		0,02	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01
P tot.		153	206	201	164	234	196	93,5	103	75	84	108	75	103	145	182	103	136	178
P _{ass}		17,8	16,6	34,0	18,4	29,0	43,8	10,36	4,74	4,14	3,26	2,96	2,96	9,18	5,27	13,19	2,93	3,81	11,43
% P _{ass}		11,6	8,06	16,9	11,2	12,4	22,4	11,1	4,60	5,52	3,88	2,74	3,95	8,91	3,63	7,25	2,84	2,80	6,42
C org.		0,27	0,20	0,19	0,13	0,13	0,08	0,11	0,11	0,07	0,12	0,14	0,04	0,19	0,25	0,02	0,18	0,18	0,01
gran	c	5,2	9,8	10,1	6,5	10,7	9,9	7,3	12,0	9,0	8,1	11,8	7,8	5,3	10,5	13,3	5,1	10,2	12,6
	l	13,2	14,7	8,6	11,2	12,5	9,6	11,1	12,1	11,9	15,3	12,5	12,9	11,8	7,9	1,01	9,9	12,0	12,0
	s	81,6	75,5	81,3	82,3	76,8	80,6	81,6	75,9	79,1	76,6	75,7	79,3	82,9	81,6	76,5	85,0	77,8	75,4

Mg, Ca, P_{total} et P_{ass} en mg / kg

MCsat = saturation Mg+Ca de la CEC en pourcentage

CEC en meq / 100 g - sol sec

C organique et N_{total} en pourcentage

granulométrie :

c = argile en %

l = limon en %

s = sable en %

Tableau II.2.1e : Analyse du sol sous et à l'extérieur de trois arbres de chaque espèce - trois couches (0-20 cm, 20-50 cm, 50-100 cm).

Combretum ghasalense							
		1		2		3	
		sous l'arbre	à l'extérieur de l'arbre	sous l'arbre	à l'extérieur de l'arbre	sous l'arbre	à l'extérieur de l'arbre

		0-20	-50	-100	0-20	-50	-100	0-20	-50	-100	0-20	-50	-100	0-20	-50	-100	0-20	-50	-100
pH-H ₂ O		5,66	5,57	5,98	5,90	5,48	5,35	5,40	4,72	4,42	5,53	5,45	5,21	5,46	5,10	5,00	5,38	4,88	5,16
pH-KCl		4,87	4,58	5,15	4,52	3,87	3,89	4,44	3,85	3,78	4,21	3,88	3,78	4,13	3,78	3,75	3,99	3,84	3,69
pH		0,79	0,99	0,83	1,38	1,61	1,46	0,96	0,87	0,64	1,32	1,57	1,43	1,33	1,32	1,25	1,39	1,04	1,47
Ca		1,35	1,00	1,70	0,48	0,13	0,31	0,57	0,74	0,48	0,65	0,65	0,57	0,74	0,57	0,48	0,65	0,48	0,39
Mg		0,62	0,63	0,69	0,34	0,47	0,62	0,47	0,75	0,64	0,40	0,66	0,65	0,38	0,42	0,51	0,39	0,53	0,52
Mg+Ca		1,97	1,63	2,39	0,82	0,6	0,92	1,04	1,49	1,12	1,05	1,31	1,22	1,12	0,99	0,99	1,04	1,01	0,91
MCsat.		102 ?	79,1	90,9	65,1	37,5	45,1	65,0	68,7	49,1	70,5	67,5	59,2	98,2	51,0	57,9	82,5	59,1	44,2
CEC		1,94	2,06	2,63	1,26	1,60	2,06	1,60	2,17	2,28	1,49	1,94	2,06	1,14	1,94	1,71	1,26	1,71	2,06
N tot.		0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01					
P tot.		94	89	93	79	75	79	70	84	80	70	80	80	75	80	84	55	65	80
P _{ass}		4,66	3,20	4,07	2,04	1,46	2,62	2,62	2,04	1,75	1,75	1,46	1,75	3,78	2,91	2,04	2,04	1,75	1,75
% P _{ass}		4,96	3,60	4,38	2,58	1,95	3,32	3,74	2,43	2,19	2,50	1,83	2,18	5,04	3,64	2,43	3,71	2,69	2,19
C org.		0,29	0,22	0,15	0,23	0,17	0,21	0,28	0,20	0,15	0,25	0,15	0,15	0,21	0,23	0,11	0,17	0,06	0,06
gran	c	5,6	8,4	11,5	4,5	7,7	10,9	4,7	11,3	12,2	5,1	9,9	11,5	5,3	9,3	9,7	6,3	9,2	10,7
	l	9,9	11,3	11,4	9,8	8,2	12,7	13,7	9,0	8,2	9,4	7,4	8,1	7,7	10,4	9,4	9,7	9,5	10,5
	s	84,5	80,2	77,1	85,7	84,1	76,4	81,6	79,7	79,6	85,4	82,7	80,4	86,9	80,3	80,9	84,0	81,3	78,8

Mg, Ca, P_{total} et P_{ass} en mg / kg

MCsat = saturation Mg+Ca de la CEC en pourcentage

CEC en meq / 100 g - sol sec

C organique et N_{total} en pourcentage

granulométrie :

c = argile en %

l = limon en %

s = sable en %

Tableau II.2.1f : Analyse du sol sous et à l'extérieur de trois arbres de chaque espèce - trois couches (0-20 cm, 20-50 cm, 50-100 cm).

Commiphora africana																			
		1						2						3					
		sous l'arbre			à l'extérieur de l'arbre			sous l'arbre			à l'extérieur de l'arbre			sous l'arbre			à l'extérieur de l'arbre		
		0-20	-50	-100	0-20	-50	-100	0-20	-50	-100	0-20	-50	-100	0-20	-50	-100	0-20	-50	-100
pH-H ₂ O		4,91	4,89	4,13	4,84	4,37	4,01	4,45	4,34	5,44	5,08	4,77	5,26	5,72	5,92	6,20	6,12	6,00	5,80
pH-KCl		4,39	4,34	3,74	4,35	3,88	3,66	3,96	3,89	3,80	4,11	3,89	3,83	4,55	4,59	5,29	4,83	4,25	4,05
pH		0,52	0,55	0,39	0,49	0,49	0,35	0,49	0,45	1,64	0,97	0,79	1,43	1,17	1,33	0,91	1,29	1,75	1,75

Ca		1,10	1,00	0,39	1,00	0,57	0,48	1,08	0,65	0,65	1,08	0,83	0,74	0,65	1,08	1,87	0,57	0,65	0,91
Mg		0,76	1,14	0,66	0,62	0,73	0,75	1,13	1,27	1,16	0,95	1,40	1,24	0,30	0,56	0,56	0,30	0,52	0,62
Mg+Ca		1,86	2,14	1,05	1,62	1,30	1,23	2,21	1,92	1,81	2,03	2,23	1,98	0,95	1,64	2,43	0,87	1,17	1,53
MCsat.		81,6	87,1	43,8	78,6	47,4	49,0	78,1	62,3	60,9	74,1	69,7	61,9	75,4	79,6	88,7	76,3	63,9	63,8
CEC		2,28	2,74	2,40	2,06	2,74	2,51	2,83	3,08	2,97	2,74	3,20	3,20	1,26	2,06	2,74	1,14	1,83	2,40
N tot.		0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01
P tot.		131	159	154	117	173	178	131	122	103	112	117	112	98	122	150	79	131	150
P _{ass}		4,98	6,74	12,89	3,22	7,03	16,12	3,22	2,05	2,05	2,93	2,93	2,05	6,69	7,57	27,9	5,24	9,89	17,2
% P _{ass}		3,80	4,24	8,37	2,75	4,06	9,06	2,46	1,68	1,99	2,62	2,50	1,83	6,83	6,20	18,6	6,63	7,55	11,5
C org.		0,22	0,17	0,12	0,22	0,09	0,10	0,19	0,14	0,01	0,25	0,17	0,19	0,26	0,19	0,21	0,27	0,22	0,16
gran	c	7,6	10,9	9,8	7,1	11,6	10,5	11,7	13,0	12,6	10,8	13,3	13,1	3,6	6,7	9,7	3,4	7,4	10,6
	l	10,0	10,3	9,9	11,4	11,1	7,7	11,9	10,6	10,8	10,7	11,1	9,9	6,4	8,5	8,0	8,3	5,7	8,1
	s	82,4	78,8	80,3	81,5	77,3	81,8	76,4	76,4	76,6	78,5	75,6	76,9	90,0	84,8	82,3	88,4	86,9	81,3

Mg, Ca, P_{total} et P_{ass} en mg / kg

MCsat = saturation Mg+Ca de la CEC en pourcentage

CEC en meq / 100 g - sol sec

C organique et N_{total} en pourcentage

granulométrie :

c = argile en %

l = limon en %

s = sable en %

II.3. Décomposition de la litière d'arbre et fractionnement de la matière organique du sol

II.3.1. Introduction

Dans les zones tropicales, une large partie de la fertilité physique et chimique du sol se rapporte à la matière organique.

Bien que la comparaison des propriétés chimiques du sol ne fasse apparaître aucune différence nette dans la quantité totale de la matière organique des sols situés sous les arbres par rapport à l'extérieur, il peut exister des différences dans le type de matière organique. Celles-ci peuvent exercer une influence sur les deux fonctions de la matière organique : i) apport nutritif, ii) amélioration des propriétés chimiques et physiques du sol. En conséquence, il s'agissait ici d'étudier plus étroitement la matière organique : i) en contrôlant la décomposition de la matière dont est faite la litière d'arbre, ii) en déterminant les fractions de matière organique du sol.

La litière d'arbre affecte la décomposition et la matière organique du sol. Sa qualité est variable, ce qui représente un avantage pour l'(agro)-écosystème. Ces diverses qualités : i) contribuent à l'apport nutritif ou ii) améliorent les propriétés chimiques et physiques du sol. Ces deux fonctions-là s'excluent l'une par rapport à l'autre.

La plupart des organismes utilisent des matières de grande qualité (sucres, protéines) qui subissent une décomposition rapide et dans une large mesure. Des matières de basse qualité (lignine, polyphénols) sont dépolymérisées par seulement quelques espèces microbiologiques - elles se décomposent lentement et dans une moindre mesure, et sont transformées en des types plus stables de matière organique du sol (Coleman *et al.* - 1989) ([annexe 2](#)).

S'il y a beaucoup d'élément nutritive, les végétaux poussant rapidement produisent une litière riche en élément nutritive qui se décompose rapidement. Le cycle nutritif est largement externe. Dans des conditions nutritives pauvres, des espèces végétales plus efficaces (moins de N par unité de croissance) ont retiré les éléments nutritifs avant que leurs feuilles ne tombent (translocation) et le cycle nutritif est largement interne (70 % de P et 40 % de N pour des arbres à feuillage persistant à maturité). En outre, la végétation des sols non fertiles contient plus de tanin, gênant la décomposition ([Breman & Kessler - 1995](#)).

D'autres facteurs exerçant un effet sur la décomposition sont : la température, l'humidité du sol, l'apport en oxygène, les minéraux argileux, les cations et les activités des racines des végétaux, les micro-organismes et les animaux. A des températures élevées, les taux de rotation augmentent ($Q_{10} = 2$; pour une augmentation de 10deg.C, la vitesse est 2 fois plus rapide), donnant des constantes de vitesse de décomposition : $k_{lit} < 1$, (telles que les valeurs k_c pour la rotation de l'humus - temps nécessaire à la transformation de toute la litière (?).) alors que dans les régions tempérées : $k_{lit} = 1-2$ (Coleman *et al.* - 1989 ; Young - 1991). Dans les régions arides, la décomposition est limitée par l'humidité disponible qui est un déterminant plus puissant que la latitude ou la température, pour ce qui concerne la matière organique du sol. La teneur argileuse est un autre facteur d'importance. Dans des régressions multiples de facteurs déterminant les teneurs en matière organique, la teneur argileuse du sol représentait 47,5 % de la variance, et les précipitations : 57,2 % (Coleman *et al.* - 1989). Une teneur argileuse supérieure est associée à des vitesses de décomposition inférieures. La décomposition des matières végétales est dominée par des groupes d'organismes semblables dans le monde entier, mais leur importance relative diffère largement entre les climats et les sols (Coleman *et al.* - 1989).

L'évolution générale de la décomposition des matières organiques est la suivante : une perte relativement rapide sur la première période (3-6 mois sous les tropiques ; 1-2 ans dans les régions tempérées) se modifiant tout à fait brutalement en une perte plus lente. Cette évolution ne change pas entre les différents sols (Young - 1991).

La matière organique du sol (MOS) est constituée de plusieurs fractions, divisées plus ou moins en matière organique active/labile et en matière organique stable ([annexe 2](#)). Le premier groupe est prioritairement important pour l'apport nutritif, le second pour son influence sur les propriétés physiques et chimiques du sol.

Il existe diverses théories en ce qui concerne l'origine des fractions. La plus ancienne est que la matière organique stable provient de la matière organique labile, et constitue une forme plus ancienne. Une théorie plus récente est que les litières végétales de qualité diverse contribuent différemment aux propriétés et à l'entretien des fractions de matière organique du sol (Swift dans : Young - 1991).

La fraction labile/active a environ le même rapport C/N que les végétaux dont elle tire son origine. Cette fraction légère représente en moyenne un quart à un tiers de la matière organique totale du sol où la température ou la sécheresse empêche la fragmentation par la faune du sol. Sur les sols tropicaux avec de l'eau en quantité suffisante et des températures élevées, cette fraction peut représenter seulement 2 % de la matière organique totale du sol.

La matière organique stable du sol doit sa faible capacité de décomposition à la protection existant dans les agrégats du sol, et à la structure complexe de ses molécules. La formation d'acides humiques en cours de décomposition et de transformation de résidus végétaux s'accompagne souvent d'augmentations de C-alkyle, accroissant ainsi la proportion de C-alkyle tandis qu'évoluent la décomposition et l'humification. Le C-alkyle constitue une forme récalcitrante du C du sol, pénétrant dans les micropores de l'argile.

La matière organique des fractions limoneuses fines et argileuses grossières sont les plus stables, contrairement à la matière organique des argiles fines qui se transforment plus facilement en minerais. La matière organique de la fraction sableuse est la moins stable. Des temps de séjour prolongés sont associés à la profondeur du profil, causés probablement par les gradients des conditions chimiques et physiques, limitant les vitesses de minéralisation (Coleman et al - 1989).

Bien que la plupart des documents traitant de la matière organique du sol prennent en compte l'existence de fractions labiles et stables, les méthodes permettant de déterminer ces différentes fractions font défaut. Une méthode de détermination des fractions de matière organique grossière est actuellement mise au point par Meyboom & Hassink ([annexe 5](#)). Elle se base sur le principe suivant lequel la matière organique s'accroît en densité en vieillissant. Bien que cette méthode soit largement critiquée du fait qu'elle se rapporte uniquement à une partie mineure de la matière organique totale du sol - (la macro MOS est souvent < à 10 % de la MOS totale) - il se peut qu'elle donne quelque indication sur l'effet qu'exercent les arbres sur la matière organique du sol.

La matière organique grossière subit plus l'influence des arbres que la matière organique totale du sol, cette dernière se rapportant plus à la teneur en argile du sol. La quantité totale et la distribution sur les fractions de matière organique grossière se rapportent plus à la qualité et à la quantité de matière organique fournie. En cas d'apports supplémentaires de matière organique, l'accroissement relatif de la matière organique grossière dépasse l'accroissement relatif du C organique total (Hassink - 1995).

II.3.2. Matériels et méthodes

On procède à l'incubation de la litière de branches et de feuilles afin de surveiller la vitesse de décomposition - après l'incubation, la matière organique grossière du sol est fractionnée afin d'étudier la transformation de la litière d'arbre dans la matière organique du sol.

Pour étudier l'influence finale qu'exercent les arbres avec tous leurs apports en litière dans des conditions naturelles, les fractions de matière organique grossière du sol sont déterminées par les échantillons de terre, tels que prélevés pour les analyses du sol (chapitre II.2).

Durant la seconde moitié du mois d'octobre, des branches et de la litière de feuilles ont été ramassés pour chacune des six espèces d'arbres. Des échantillons ont été broyés et mis en incubation dans un sol sableux de la surface de la ferme de Niono. Ce sol a été analysé pour recherche de la teneur en C organique, la texture, le phosphore, la CEC, les Ca, Mg et pH. On a rassemblé des informations sur les teneurs en fibre brute, azote et phosphore, et sur la digestibilité des feuilles et branches des six espèces d'arbres. Pour la litière de branche, les valeurs ont été déterminées à l'AB-DLO/Wageningen, à partir de la même matière que celle qui a été incubée. Les valeurs de la litière de feuilles proviennent des informations rassemblées par [Breman & Kessler \(1995\)](#), à l'exception d'une colonne de valeurs de N (N^{SR}), déterminée à partir de la matière initialement incubée au laboratoire (« Laboratoire des Sols » - Sotuba).

Pour chacun des échantillons, 3 coupelles (125 ml) ont été remplies (sans les tasser) de 50 g de terre humide mélangée à 0,3 g de cet échantillon (+ 3 témoins ; sol sans ajout de matière organique). Chaque coupelle (fig. II.3.1 - coup. A) a été placée dans un récipient en verre à proximité d'une coupelle de 25 ml de 10 ml de NaOH (0,5 N) (fig. II.3.1 - coup. B). Le récipient a été soigneusement fermé afin d'éviter un échange gazeux avec l'air extérieur.

La vitesse de décomposition est déterminée en mesurant le CO_2 produit à intervalles réguliers (3 jours, 1 semaine - 2, 5, 8 et 12 semaines à partir du début de l'incubation). Le CO_2 libéré du mélange de matière organique du sol de la coupelle A est piégé par le NaOH, à l'intérieur de la coupelle B.

[Figure II.3.1.](#) Récipient en verre étanche à l'air avec des coupelles remplies de terre (A) et de NaOH (B).

Avant de titrer, le CO_3^{2-} de la coupelle B est précipité avec du Ba^{2+} (après ajout de $BaCl_2$) - le NaOH restant dans la coupe B est titré ensuite avec du HCl (0,5 N). La quantité de HCl nécessaire pour atteindre un pH de 8,5 est utilisée pour calculer le volume de CO_2 produit, ceci par l'équation :

$$(A-B) * 3 = \text{mg C}$$

A = ml de HCl nécessaire pour atteindre un pH de 8,5 pour le sol « blanco »

B = ml de HCl nécessaire pour atteindre un pH de 8,5 pour le sol avec de la matière organique.

A partir du même sol contenant les mêmes quantités de matière organique, les fractions de matière organique grossière sont déterminées après 12 semaines d'incubation : 500 g de terre humide avec 3 g des 12 matières organiques broyées (3 répétitions et 3 blanco ; les résultats d'analyses de P pour 12 échantillons de litières d'arbre varient largement des résultats d'analyses des mêmes matières, réalisées à l'AB-DLO/Wageningen.) sont versés (sans tassement) dans des récipients en plastique recouverts d'une feuille en polyéthylène perméable à l'oxygène, afin d'éviter que la terre ne sèche. Après incubation, les trois répétitions sont rassemblés pour assurer que les pertes de matière organique par lavage de la terre seront minimums. La séparation de la matière organique grossière et du sol minéral, et la détermination des trois fractions, sont réalisées suivant la méthode Ludox de Meyboom & Hassink ([annexe 5](#)).

A partir des sols prélevés par tarière et mélangés comme décrit au chapitre II.2, un sous-échantillon de 5 kg pour un arbre de chaque espèce - sous et à l'extérieur des arbres - est prélevé pour la couche de 0-20 cm et 20-50 cm, pour déterminer les différentes fractions de matière organique grossière suivant la méthode Ludox ([annexe 5](#)).

II.3.3. Résultats

Décomposition de la litière et fractionnement

Les résultats de l'incubation des matières de branche et de feuille broyées sont représentés dans la [II.3.2](#).

Généralement parlant, la décomposition de la litière de feuilles est environ 2 fois aussi forte que la décomposition de litière de branche pour chaque arbre, exception faite d'une plus faible différence pour la litière du *Commiphora africana*.

Les feuilles du *Balanites aegyptiaca* présentent la plus forte décomposition dans les trois premières semaines à partir du début de l'incubation, suivies de près par la décomposition des feuilles de l'*Acacia senegal*, qui reprend la première place au bout de trois semaines, présentant ainsi la plus forte décomposition au terme de 12 semaines.

Ce sont les feuilles du *Commiphora africana* et *Sclerocarya birrea* qui se décomposent le moins, même moins que les branchages de l'*Acacia senegal*, du *Combretum ghasalense* et du *Balanites aegyptiaca*.

La décomposition des feuilles du *Combretum ghasalense* et de l'*Acacia seyal* commence lentement, à la même vitesse environ que pour les feuilles des *Commiphora* et *Sclerocarya*. Au bout de 10 jours, leur vitesse de décomposition se réduit moins que pour les autres espèces, et leur décomposition au terme des 12 semaines avoisine celle des feuilles de *Balanites*.

La courbure des lignes au terme de la période d'incubation est telle que l'on peut s'attendre à ce que - dans le cadre d'une incubation plus longue - la décomposition des feuilles de l'*A. senegal*, de l'*A. seyal* et du *Combretum ghasalense* se poursuive encore un peu, tandis que cet aspect est négligeable pour les autres.

[Figure II.3.2](#). Décomposition de la litière de feuilles. (figure supérieure) et de branches (figure inférieure).

(mg C decomposed in 50 gr moist soil -> mg de C décomposé dans 50 g de terre humide ; days after start incubation -> ... jours après le début de l'incubation)

La décomposition de la litière de branches s'illustre de la même façon bien que l'ordre des espèces soit quelque peu différent (changement de position du *Sclerocarya birrea* et du *Commiphora africana*).

Les branches de l'*Acacia senegal* subissent la plus forte décomposition durant la totalité des 12 semaines. Les courbes de

décomposition des 5 autres espèces d'arbres ont à peu près la même forme et suivent dans l'ordre suivant : *Balanites aegyptiaca* , *Combretum ghasalense*, *Acacia seyal*, *Commiphora africana* et *Sclerocarya birrea*.

Les teneurs en fibres brutes, azote et phosphore, et la digestibilité des feuilles et branches des six espèces d'arbres sont indiquées dans le tableau II.3.1.

Il existe de grandes différences entre la teneur en N des feuilles utilisées pour les incubations - et analysées à Sotuba - par comparaison avec les valeurs moyennes rassemblées par [Bremner & Kessler \(1995\)](#). Un autre point qu'il convient de souligner est que la teneur en fibre brute des feuilles de *Balanites* décroît lorsque les feuilles vieillissent (pour les autres - du moins pour celles qui ont été ramassées - la tendance s'inverse, comme on peut s'y attendre).

Les corrélations par rang sont réalisées suivant un test de Spearman, entre la décomposition des 12 matières (6 branches, 6 feuilles) au terme des 12 semaines d'incubation ([figure II.3.2](#)) et d'autre part la teneur en fibre brute (tableau II.3.1) (le rang 1 correspondant à la plus basse teneur en fibre brute) ou en N (tableau II.3.1) (le rang 1 correspondant à la plus haute teneur en N) ou bien à la fois en fibre brute et N (les rangs des propriétés individuelles sont ajoutés, et les sommes sont à nouveau classées) (tableau II.3.2).

Lorsqu'on analyse ensemble les branches et les feuilles, il y a une corrélation par rang significative entre la décomposition et la fibre brute (teneur en fibre brute élevée basse décomposition), la décomposition et la teneur en N (teneur en N élevée décomposition élevée), et entre la décomposition et les teneurs en fibre brute + N.

Néanmoins, lorsqu'on établit séparément les mêmes corrélations entre les six feuillages et les six branchages, la corrélation est moins importante : entre la décomposition des feuilles et la digestibilité des feuilles (= 0,05), entre la décomposition des feuilles et la teneur en N (= 0,1), entre la teneur en N des branches et la décomposition (= 0,05) et entre la teneur en N + fibre brute et décomposition (= 0,1).

Les résultats du fractionnement de la matière organique grossière après incubation de la litière de feuille et de branche sont indiqués dans le tableau II.3.3. Les totaux de ces fractions-là (matière organique grossière totale) sont comparés à l'étendue de la décomposition de litière. Parmi toutes ces matières, la corrélation par rang suivant le test de Spearman est significative (= 0,01) : plus la décomposition est forte, moins il en reste dans la matière organique grossière. La fraction influençant le plus la bonne corrélation entre la décomposition et la matière organique grossière totale est la fraction du poids moyen. Comme le représente le tableau II.3.2a, le poids après incubation de la fraction intermédiaire indique très clairement une corrélation avec la décomposition, les fibres brutes et la teneur en N de la matière initiale. Les fractions légères et lourdes indiquent une faible corrélation, sinon une absence totale de corrélation, par rapport à ces variables.

La corrélation linéaire au sein des litières de feuilles et des litières de branches est également assez bonne ; néanmoins, en raison du faible nombre d'échantillons, il est impossible de conclure suivant le fait que la corrélation entre la décomposition et le résidu total de la matière organique grossière est significative.

Le tableau II.3.4 représente à la fois les données sur la perte de C par décomposition, et la perte de C suivant la matière organique grossière résiduelle (g C / kg de sol humide). La colonne mentionnée « C transformé » représente le C disparaissant de la matière organique grossière sans minéralisation en CO₂. La concentration de C transformé est calculée en tant que différence entre le C disparu de la matière organique grossière ((6 - m.o. grossière -résiduelle totale) * 0,5) et le C décomposé, et les deux en g par kg de sol humide. Ce « C transformé » est généralement quelque peu supérieur pour les feuilles, par rapport aux branches, mais il y a de larges différences entre les espèces à l'intérieur de ces groupes.

Fractionnement de la matière organique du sol

Les résultats des fractions de matière organique et de la matière organique totale sont indiqués dans le tableau II.3.5.

Les déterminations de matière organique totale sont réalisées par deux fois : une fois au « Laboratoire des sols de Sotuba », une fois à l'AB-DLO/Haren. Les teneurs diffèrent considérablement, et il n'y a ni réduction ou augmentation régulière sur la profondeur (jusqu'à 50 cm), ni d'importantes différences très nettes sous et en-dehors des arbres.

La teneur en matière organique grossière totale est plus élevée sous les arbres qu'à l'extérieur, avec des facteurs de différence (sous : à l'extérieur) comme indiqué au tableau II.3.6. Les *Acacias* présentent la principale différence, et le *Commiphora africana* la plus petite.

A la surface du sol, la teneur en matière organique grossière est 2 - 3,5 fois supérieure par rapport à la deuxième couche, à la fois sous les arbres et à l'extérieur.

Pour ce qui concerne *la couche supérieure*, les quantités absolues de toutes les fractions de matière organique grossière sont plus élevées sous l'arbre qu'à l'extérieur de celui-ci (exception faite de la fraction légère sous le *Balanites aegyptiaca*). La proportion de fraction légère de matière organique grossière totale est plus grande sous les arbres - la proportion de fraction intermédiaire est plus grande sous les arbres qu'à l'extérieur. La proportion de fraction lourde est parfois supérieure, parfois inférieure.

L'importance relative de la fraction intermédiaire peut être interprétée à partir du tableau II.3.6 : les facteurs d'accroissement des fractions légères, moyennes et lourdes sont comparés au facteur d'accroissement de la matière organique grossière totale. Lorsque le facteur d'accroissement d'une fraction se situe au-dessous du facteur d'accroissement du total, la fraction ajoute relativement peu - lorsqu'il se situe au-dessus du total, elle ajoute relativement beaucoup. Seule pour la fraction légère du *Balanites aegyptiaca* la valeur est inférieure à 1, ce qui signifie que même la quantité totale de la fraction légère est inférieure sous l'arbre, par rapport à l'extérieur de celui-ci.

En ce qui concerne *la seconde couche*, il se produit à peu près la même chose - à l'exception du *Commiphora africana*, la fraction intermédiaire est proportionnellement supérieure et la fraction légère est proportionnellement inférieure sous les arbres, par rapport à l'extérieur, bien que les quantités absolues pour toutes les fractions soient presque toujours supérieures sous les arbres.

L'importance relative de la fraction intermédiaire et l'importance relativement faible de la fraction légère sont conformes à l'importance de ces fractions au terme de 12 semaines d'incubation de la litière branche-feuille, comme susmentionné.

D'autres relations directes du fractionnement de la matière organique après incubation de la litière branche-feuille, par rapport au fractionnement des sols sous et en-dehors des différentes espèces d'arbres ne sont pas aussi nettes que cela.

II.3.4. Discussion

Décomposition de la litière et fractionnement

L'étendue et la vitesse de décomposition de la matière organique peuvent être révélatrices de sa contribution à l'apport nutritif, tout particulièrement de N (et S) qui sont liés homopolairement à C et donc minéralisés par minéralisation du C organique (Coleman *et al.* - 1989). Les litières de *l'Acacia senegal*, suivies de près par le *Balanites aegyptiaca*, présentent la plus forte décomposition et les teneurs en azote les plus élevées parmi les six litières de feuilles et les six litières de branches. Ceci peut indiquer que ces deux espèces-là favorisent l'apport de N (et S) sous leurs frondaisons, et ceci relativement plus que les autres espèces.

L'Acacia seyal et le *Combretum ghasalense* favorisent l'apport nutritif dans une moindre mesure, et cette fonction de la matière organique est relativement faible pour le *Sclerocarya birrea*, et très basse pour le *Commiphora africana* (tableau II.3.7).

Tableau II.3.7 : $N \text{ Minéralisé} = \text{Décomposition} * \text{teneur en N de la litière au terme de 12 semaines d'incubation de 0,3 g de matière dans 50 g de terre.}$

	N - décomp. de feuilles	N - décomp. de branches
<i>Acacia senegal</i>	4,25 mg	1,16 mg
<i>Balanites aegyptiaca</i>	3,78 mg	0,65 mg
<i>Acacia seyal</i>	2,23 mg	0,42 mg
<i>Combretum ghasalense</i>	2,17 mg	0,41 mg
<i>Sclerocarya birrea</i>	1,28 mg	0,25 mg
<i>Commiphora africana</i>	0,63 mg	0,30 mg

Ainsi que Coleman *et al.* (1989), et [Bremner & Kessler \(1995\)](#) l'ont indiqué, la décomposition de matière organique est déterminée en partie par la fibre brute (entre autres la lignine) et la teneur en azote : plus la teneur en fibre brute est faible, plus la vitesse de décomposition est élevée - plus la teneur en azote est élevée, plus la vitesse de décomposition est élevée. Pour nos matières, ce ne sont cependant que des déterminants approximatifs fixés principalement pour estimer la capacité de décomposition de matières largement différentes. La corrélation n'est pas aussi nette qu'on peut le penser, parmi des matières de nature identique et approximativement de même qualité - comme c'est le cas pour les litières de feuilles ou de branches. Le rapport décomposition - azote au sein de ces groupes-là demeure significative (pour = 0,1), mais la décomposition- relation fibre brute n'est pas significative.

Les corrélations plutôt faibles peuvent être dues à la variation plus indépendante survenant dans le N, la lignine et les polyphénols dans les végétations tropicales (Coleman *et al.* - 1989). Que d'autres éléments nutritifs (par ex. P) limitent la décomposition est également possible. L'environnement est très pauvre et les éléments nutritifs sont largement retirés des feuilles avant leur chute. Ceci est plus important pour les litières de feuille que pour les branches puisque la translocation à partir de la litière de feuilles est au plus haut : 70 % de P et 40 % de N ([Bremner & Kessler - 1995](#)).

L'immobilisation de P survient à des rapports C/P de 100-500, c.à.d. lorsque la teneur en P est 1-5 g / kg. La teneur en P de notre litière de branches est toujours 1 g / kg (tableau II.3.1), ce qui signifie que l'immobilisation de P se fait et que les teneurs faibles en P empêchent la décomposition.

Cela n'est cependant pas argumentée par une bonne corrélation entre la décomposition des litières de branches et leur teneur en P.

Certaines litières se décomposent lentement et dans une faible mesure, ce qui a peu d'importance au regard de la fonction d'apport nutritif de la matière organique (1ère fonction de la m.o.).

L'hypothèse de Swift (dans : Coleman *et al.* - 1989) consiste à dire que des matières organiques de qualité différente peuvent fournir différemment aux diverses fractions de matière organique du sol. Cela laisserait supposer que les litières à décomposition lente peuvent ajouter plus à la fraction de matière organique stable, améliorant ainsi les propriétés chimiques et physiques du sol (2ème fonction de la m.o.).

Les justifications théoriques plus anciennes, selon lesquelles les fractions de matière organique stables sont une forme plus âgée de la matière organique, provenaient des fractions labiles. Ceci laisserait supposer que la litière à décomposition lente ne fait que ralentir la minéralisation de l'élément nutritive, de même que la formation de matière organique stable du sol. Le fractionnement de matière organique grossière du sol au terme de 12 semaines d'incubation pourrait fournir quelques éléments à cet égard.

Le pool de C transformé peut contenir du C transformé en matière organique fine, en humus plus stable. Après l'incubation, il

n'en va pas de même : les matières se décomposant plus difficilement (litière de branches en général) ne fournissant pas plus au regroupement de C transformé. Au contraire, les matières se décomposant plus facilement sont encore majoritairement présentes dans la matière organique grossière, ce qui signifie que sur cette période de 12 semaines, elle n'ajoute pas à l'apport nutritif, ni à la matière organique plus stable du sol de par son influence sur les propriétés chimiques et physiques du sol. Il serait intéressant de poursuivre une telle incubation sur une période plus longue, pour savoir si le C organique des matières se décomposant à peine, stockées dans la fraction de poids moyen au terme de 3 mois, poursuivra sa minéralisation ou sera transformé en des formes d'humus plus stables.

En associant les données du C transformé et du C de la matière organique grossière (tableau II.3.4), on peut conclure que les feuilles de *l'Acacia senegal* ajoutent (et ajouteront) le moins au C transformé par unité de C de litière, étant ainsi moins aptes à favoriser les propriétés chimiques et physiques telles la CEC, la complexation avec les ions métalliques, la stabilité de la structure ... etc. (cf. 1ère partie), puisque cela ne contribue que peu à la concentration `C transformé` et que peu de matière organique grossière résiduelle pourrait ajouter à ce regroupement, à long terme.

De ce point de vue-là, la litière de feuilles des *Sclerocarya birrea*, *Commiphora africana* et *Combretum ghasalense* pourrait être la plus favorable puisque que ces arbres ajoutent déjà à la majeure partie du regroupement de C transformé, et qu'il leur reste de la matière organique grossière pouvant en faire de même à long terme.

Il est plus difficile d'interpréter les résultats de la décomposition de litière de branches. Supposant que ce qui est encore aujourd'hui de la matière organique grossière ne se décomposera pas plus avant - (puisque les pentes des courbes de décomposition de la [figure II.3.2](#) sont très basses) -, la transformation va soit se poursuivre, soit simplement s'arrêter aussi.

Si la transformation se poursuit sans beaucoup de minéralisation, les litières de branches viendront ajouter à la matière organique fine stable, favorisant les propriétés chimiques et physiques du sol. L'importance de cet ajout ne sera probablement pas supérieure à celle des feuilles du *Sclerocarrya birrea* et du *Commiphora africana*, étant donné que le C transformé des matières de branche est toujours inférieur à ces feuilles-là alors que la matière organique grossière résiduelle est seulement légèrement supérieure (pour *l'Acacia seyal*, *l'Acacia senegal*, le *Balanites aegyptiaca* et le *Combretum ghasalense*). De ce point de vue-là, peu de choses peuvent être dites sur l'importance finale du C transformé des branches du *Sclerocarya birrea* et *Commiphora africana*, étant donné que le résidu du regroupement de matière organique grossière est élevé et que la quantité de C transformé est faible ; néanmoins, elle peut être finalement comparable aux autres matières de branches.

Si la transformation cesse purement et simplement, de même que la minéralisation, il peut rester sous les arbres de larges quantités de matière organique grossière, ni fonctionnelles pour l'apport nutritif ni pour l'amélioration des propriétés physiques et chimiques du sol par de la matière organique humique, tant que l'équilibre final n'est pas atteint.

Pour résumer : la litière hautement décomposable (feuilles de *Acacia senegal* et de *Balanites*) ajoute principalement à l'apport nutritif. La litière se décomposant quelque peu moins bien (feuilles de *Combretum*, *Sclerocarya* et de *Commiphora*) ajoute à la matière organique du sol plus stable, en favorisant probablement les propriétés physiques du sol et les propriétés chimiques comme la CEC et les capacités d'adsorption/précipitation. Cela soutient la théorie de Swift selon laquelle une litière de qualité différente fournit différemment aux diverses fractions de matière organique du sol.

La litière qui se décompose encore moins bien - telle les branches - peut exiger plus de temps pour être valable d'une quelconque façon ; par conséquent, leur inutilité en tant qu'intégrale au fil du temps peut être plus faible. Pour à la fois l'apport nutritif et l'apport en matière organique stable, elles demeurent sous une forme légère inactive pendant longtemps. La théorie plus ancienne considère probablement cette forme légère inactive comme la matière organique du sol d'où proviennent des fractions plus stables avec le vieillissement. Conséquemment, les deux théories peuvent être en partie valables conformément aux résultats de cette étude.

Au terme de 12 semaines d'incubation, la décomposition lente se rapporte aux quantités résiduelles élevées de matière organique grossière (tableaux II.3.2 et II.3.3). Cette relation est influencée principalement par la relation entre la décomposition et la matière organique grossière de poids moyen. La raison pour laquelle le poids de la fraction intermédiaire

est le principal déterminant de la bonne corrélation entre la matière organique grossière totale et la décomposition n'est pas claire. Une explication possible peut résider dans le fait que la fraction légère est ` transformée ` en fraction moyenne sans minéralisation d'importance, et sans être beaucoup influencée par la teneur en azote ou fibre brute. Ensuite, la principale minéralisation se fait à partir de la fraction de matière organique de poids moyen.

Fractionnement de la matière organique du sol

Hassink (1995) remarque qu'avec des apports de matière organique supplémentaire, l'accroissement relatif de la matière organique grossière dépasse l'accroissement relatif de C total organique. Les augmentations de matière organique grossière sous les frondaisons - comme démontré par les résultats du tableau II.3.5 - peut ainsi indiquer un apport complémentaire de matière organique par l'arbre, même si les mesures de C organique total ne le confirme pas.

L'importance de la fraction intermédiaire dans l'augmentation de la matière organique grossière totale des sols situés sous l'arbre - par rapport à l'extérieur de l'arbre - va de pair avec l'importance de cette fraction après incubation de la litière de feuilles et de branches.

Hassink (1995) mentionne l'importance de la fraction intermédiaire pour les sols à pâturage où l'on ajoute de la luzerne en tant que matière organique. Il ramène cela à la qualité comparativement élevée de la matière organique. D'après ses conclusions selon lesquelles les rapports C/N diminuent dans l'ordre : fraction légère - moyenne - lourde, et que les rapports C/N de la fraction légère sont pour la plupart semblables à la matière originale - qui est constituée principalement de résidus végétaux partiellement décomposés - tandis que les fractions intermédiaires et lourdes contiennent plus de matière organique du sol avec des complexes organo-minéraux (Hassink - 1995) - mes résultats peuvent être expliqués comme suit.

Je suppose que la fraction macro-organique déterminant le plus l'importance et la vitesse de décomposition dépend de la qualité initiale de la matière.

Dans l'hypothèse de matière de basse qualité (rapport C/N élevé) telle que la balle d'Hassink, la première phase de transformation de la fraction légère en fraction intermédiaire limite la vitesse, et détermine principalement la minéralisation de C, parce qu'une quantité relativement importante de C doit être minéralisée pour `aboutir` à la forme intermédiaire d'un rapport C/N plus bas.

Dans l'hypothèse de matière de plus haute qualité (comme la luzerne de Hassink et probablement notre litière de feuilles), la première transformation de fraction légère en fraction intermédiaire ne constitue pas la phase qui limite la vitesse, et une quantité relativement faible de C doit être minéralisée pour `aboutir` au rapport C/N de cette fraction-là. Dans cette hypothèse, la prochaine phase de passage de la fraction intermédiaire à la fraction lourde limite la vitesse, et la plupart du C est minéralisé pour aboutir au rapport C/N toujours inférieur de la fraction lourde.

Dans l'hypothèse de matière de haute qualité (comme le fumier d'élevage de Hassink), le rapport C/N de la matière initiale peut être tel qu'il se transforme rapidement en fraction lourde sans pertes importantes de C, et la principale décomposition s'effectue à partir de la fraction lourde - qui constitue la phase limitant la vitesse - de telle sorte que cette fraction soit relativement large.

Le fait que la litière de feuilles (et de branches) doit être de qualité supérieure à la strate herbacée de notre secteur s'accorde avec les déclarations de [Bremner & Kessler \(1995\)](#) qui indiquent que sur l'année entière, la litière végétale ligneuse a une meilleure digestibilité que la litière herbacée des zones Soudano-Sahéliennes. Ainsi, à l'extérieur des arbres où la matière organique provient principalement de la strate herbacée avec - lorsqu'elle est vieille et sèche - un rapport C/N élevé, la fraction légère est relativement importante parce que la phase entre la fraction légère et la fraction intermédiaire limite la vitesse et que la matière organique doit `attendre` dans cette fraction-là. La minéralisation à partir des autres fractions va aisément de pair avec l'apport `libéré` de la fraction légère. Sous l'arbre, une partie de la matière organique est d'une qualité quelque peu supérieure (particulièrement lorsque l'arbre est aussi à l'origine d'une autre composition d'espèce herbacée située au-dessous de lui comme pour le *Balanites* qui est concerné ici) et la minéralisation/transformation de la concentration

intermédiaire est relativement plus importante en tant que phase de limitation de vitesse dans la transformation de la matière organique.

En ce qui concerne la fourniture aux différentes fractions de matière organique du sol, cela signifierait que les matières d'un rapport C/N bas seraient capables d'ajouter plus que les fractions de matière organique stables du sol, parce que moins de C doit être minéralisé pour aboutir au rapport C/N de ces fractions-là. Les matières d'un rapport C/N très bas sont largement minéralisées et, de cette façon-là, n'ajoutent pas beaucoup aux concentrations de matière organique stable. Les matières ou les composants des matières avec un rapport C/N élevé augmenteraient la fraction légère, à peine capable de se minéraliser et de se transformer, et constituant de la sorte une source de C d'activité basse dans la fraction légère.

Des matières de qualité supérieure - comme celles provenant ici des arbres - peuvent maintenir la phase de décomposition du cycle à une vitesse supérieure, tandis que les matières de basse qualité peuvent ralentir ce cycle. Une vitesse de décomposition accrue peut probablement conduire à une disponibilité accrue de éléments nutritifs et de C organique en tant qu'intégrale au cours du temps. Une vitesse de décomposition réduite provoquée par une matière de basse qualité peut causer une faible disponibilité de éléments nutritifs ou une transformation du C organique au cours du temps. L'influence d'un arbre sur le cycle nutritif - par comparaison à un système sans arbre - peut être visualisée à la figure II.3.3.

Figure II.3.3. Cycles nutritifs au sein d'un écosystème sans et avec arbres.

1 = cycle nutritif avec décomposition à faible vitesse en raison de la basse qualité de la matière organique (strate herbacée)

2 = cycle nutritif avec vitesse de décomposition accrue en raison d'une meilleure qualité de la litière d'arbre

3 = cycle nutritif interne d'un arbre.

A l'intérieur de sols plus argileux, des fractions intermédiaires et lourdes peuvent avoir moins d'importance pour la décomposition étant donné qu'elles peuvent être grandement protégées physiquement, tandis que la fraction légère est à peine associée aux minéraux du sol (Meyboom dans : Hassink - 1995). D'autre part, une quantité plus importante de C non-macro-organique inerte peut être présente dans les sols sableux, de telle sorte que l'effet d'une texture du sol sur la minéralisation du C n'existe pas (Hassink - 1995).

L'absence d'autres relations directes entre le fractionnement de la matière organique après incubation de la litière de feuilles et de branches, et le fractionnement de la matière organique du sol sous les arbres et en-dehors, peuvent être provoqués par de nombreux facteurs : différences entre la strate herbacée sous et à l'extérieur des arbres, différences dans la quantité absolue de litière d'arbre résiduelle sous l'arbre, différences de régime d'humidité et activités (micro)biologiques (termite par exemple) et autres ajouts de litière tels que les gousses, les fleurs et les racines, le tout exerçant une influence sur la décomposition et les fractions résiduelles.

Une humidité accrue du sol réduira la teneur en matière organique grossière en raison d'une décomposition/transformation plus intensive. Via l'humidité, les exsudats de racine et l'influence exercée sur d'autres facteurs physiques, l'espèce de l'arbre peuvent influencer différemment les activités microbiologiques, de par son effet sur la vitesse et l'étendue de la décomposition.

A l'intérieur de nos sols, l'activité microbiologique peut être un facteur restrictif mineur, puisque l'activité de la biomasse microbienne est plus grande dans des sols à texture moyenne que dans des sols à texture fine.

Une autre composition d'espèce herbacée située sous un arbre (ex. : davantage d'espèces C₃ avec des concentrations nutritives supérieures) peut accroître la qualité de la litière herbacée, augmentant ainsi la décomposition et réduisant la teneur en matière organique grossière.

La faible augmentation de la teneur de matière organique grossière sous le *Commiphora africana* peut être due au faible volume de litière qu'il produit. Une raison expliquant l'importante augmentation de matière organique grossière sous les *Acacias*, par rapport aux *Balanites aegyptiaca* par exemple, peut être recherchée dans les teneurs en humidité de leurs sols :

sous ce dernier, la présence plus importante et plus longue d'humidité peut être à l'origine d'une vitesse de décomposition plus rapide, bien que sa production de litière ne soit pas bien inférieure à celle des *Acacias*. L'augmentation de la matière organique grossière sous le *Sclerocarya birrea* peut être largement due à la basse qualité de sa litière, puisque son volume est bien moindre et que l'humidité du sol est légèrement plus élevée sous les arbres, les deux facteurs ne favorisant pas la teneur en matière organique grossière.

Ce sont cependant des explications sans fondement étant donné que les quantités de litière, l'activité biologique, etc. ne sont pas déterminées.

Tableau II.3.1 : Teneur en fibre brute, azote et phosphore, et digestibilité de la matière de feuille et de branche des six espèces d'arbres.

matière	espèces	fibre grossière (g/kg)			teneur en azote		P	pourcentage de digestibilité
		jeune	sec	moyenne	SR	BK		
feuille*	BA	201	140		23	13***		59
	ASn			151	23	39		65
	ASy			148	15	26		54-59
	ScB	90	168		17	12***		43
	Cb	190	200		14	13***		43
	CiA			130	9	22		36
branche**	BA	381			8,0		0,65	
	ASn	414			13,2		0,40	
	ASy	483			6,8		0,35	
	ScB	472			5,5		0,90	
	Cb	429			5,5		0,70	
	CiA	544			5,5		0,80	

* valeurs empruntées à [Bremner & Kessler \(1995\)](#), à l'exception du SR

** valeurs de matière égale à celle utilisée pour l'incubation

*** teneur en N de feuilles sèches (les autres valeurs sont des moyennes de feuilles de toute nature de cette espèce-là) ; teneur en N des matières utilisées pour l'incubation

N et P en g/kg

Tableau II.3.2 : Test de corrélation par rang de Spearman et corrélation linéaire (+ probabilité) entre la décomposition (dec) et les teneurs en N, les fibres brutes (cf), la digestibilité (dig) et le poids résiduel (total) des fractions de matière organique grossière (frac.).

	variables	d ²	n	zones critiques	signifiante	corrélation	probabilité
feuille	dec. - c.f.	44	6	< 0,6] [64, -» pour [alpha]= 0,05	ns	,141	1,0
	dec. - NSR	8,5	6		ns	,705	,117
	dec. - N ^{B&K}	22,5	6		ns	,426	1,0
	dec. - N ^{bk} + cf	38,5	6		ns		

	dec. - dig.	3,5	6		p	,859	,028
	dec. - frac.	14	6		ns	,851	,031
branche	dec. - c.f.	14	6	< 0,6] [64, -» pour [alpha]= 0,05	ns	,793	,059
	dec. - N	6	6		p	,733	,097
	dec. - N + cf	11	6		ns		
	dec. - frac.	10	6		ns	,835	,038
feuille + branche	dec. - c.f.	112	12	< 0,118] [454, -» for [alpha]= 0,025 < 0,92] [480, -» for [alpha]= 0,01	p	,709	,009
	dec. - N ^{SR}	40,5	12		p*	,857	,000
	dec. - N ^{SR} + cf	62	12		p*		
	dec. - frac.	54	12		p*	,884	,000

d² : zone critique gauche = corrélation par rang positive

d² : zone critique droite = corrélation par rang négative

ns : corrélation par rang non significative

p : corrélation par rang positive (= 0,025)

p* : corrélation par rang positive (= 0,1)

cf : fibre brute

Tableau II.3.2a : Corrélation et probabilité des trois fractions de matière organique et leur total avec décomposition, fibre brute et teneur en N.

	décomposition	10 jours de décomposition	fibre brute	teneur en N
fraction légère	- 0,455 / 0,137	- 0,212 / 1,0	- 0,030 / 1,0	- 0,135 / 1,0
fract. moyenne	- 0,740 / 0,005	- 0,698 / 0,011	- 0,881 / 0,000	-0,749 / 0,005
fraction lourde	- 0,275 / 1,0	- 0,244 / 1,0	0,318 / 0,314	- 0,375 / 0,228
fraction totale	- 0,884 / 0,000		0,844 / 0,000	- 0,803 / 0,001

corrélation/probabilité

Tableau II.3.3 : Fractions de matière organique (au terme de 12 semaines d'incubation) de litière de branches et de feuilles de 6 espèces d'arbres.

fraction de m.o.		léger	moyen	lourd	total
blanco	poids	0,399	0,038	0,061	0,498
	%	80,1	7,7	12,2	100
SBB	poids	1,354	0,488	0,344	2,186
	%	61,9	22,3	15,8	100
YB	poids	0,238	0,670	0,339	1,247
	%	19,1	53,7	27,2	100
NB	poids	0,865	0,411	0,190	1,466

	%	59,0	28,0	13,0	100
BB	poids	0,377	0,388	0,334	1,099
	%	34,3	35,3	30,4	100
CBB	poids	0,317	0,356	0,193	0,866
	%	36,6	41,1	22,3	100
CIB	poids	1,391	0,835	0,354	2,580
	%	53,9	32,4	13,7	100
SBT	poids	0,734	3,278	0,206	4,218
	%	17,4	77,7	4,9	100
YT	poids	0,950	1,720	0,259	2,929
	%	32,4	58,7	8,9	100
NT	poids	0,434	2,054	0,395	2,883
	%	15,1	71,2	13,7	100
BT	poids	0,606	2,141	0,260	3,007
	%	20,2	71,2	8,6	100
CBT	poids	0,289	1,370	1,290	2,949
	%	9,8	46,5	43,7	100
CIT	poids	1,070	2,640	0,561	4,271
	%	25,1	91,8	13,1	100

SBB & SBT - litière de feuilles & de branches du *Sclerocarya birrea*

YB & YT - litière de feuilles & de branches de l'*Acacia seyal*

NB & NT - litière de feuilles & de branches de l'*Acacia senegal*

BB & BT - litière de feuilles & de branches du *Balanites aegyptiaca*

CBB & CBT - litière de feuilles & de branches du *Combretum ghasalense*

CIB & CIT - litière de feuilles & de branches du *Commiphora africana*

poids en g de matière organique par kg du sol humide.

Tableau II.3.4 : Combinaison des totaux de matière organique grossière et décomposition de litières de branches et feuilles après incubation.

		C de la matière organique grossière	C hors de la C de matière organique grossière	C décomposé	C transformé
feuille	ScB	1,093	1,907	0,757	1,150
	ASy	0,624	2,376	1,487	0,889
	ASn	0,733	2,267	1,847	0,420
	BA	0,550	2,450	1,645	0,805
	CbG	0,433	2,567	1,500	1,067
	CiA	1,290	1,710	0,701	1,009
branche	ScB	2,109	0,891	0,461	0,430
	ASy	1,465	1,535	0,623	0,912
	ASn	1,442	1,558	0,876	0,682

	BA	1,504	1,496	0,817	0,679
	CbG	1,475	1,525	0,752	0,773
	CiA	2,136	0,864	0,547	0,317

C de m.o. grossière : C de la matière organique grossière totale / kg * 0,5 pour obtenir le C organique total par kg

C hors de la C de matière organique grossière :

3 - C de la matière organique grossière (3 = apport en C organique initial / kg)

C décomposé : C / kg décomposé suivant les déterminations de décomposition (fig. II.3.1)

C transformé : C hors du C de mat. organique grossière - C décomposé.

Tableau II.3.5 : Fractions de matière organique des deux premières couches (0-20 cm et 20-50 cm) sous et en-dehors des arbres - un arbre par espèce.

espèce		0-20 cm					20-50 cm				
fraction >		l	m	h	tot.	m.o.	l	m	h	tot.	m.o.
sous le houppier de l'arbre											
ASy	g/kg	,886	,172	,097	1,155	13/24	,500	,110	,046	0,656	21/23
	%	76,7	14,9	8,4	100	8,88	76,2	16,8	7,0	100	3,12
ASn	g/kg	,897	,204	,157	1,258	19/28	,341	,091	,062	0,494	24/18
	%	71,3	16,2	12,5	100	6,62	69,0	18,4	12,6	100	2,06
ScB	g/kg	,509	,193	,077	0,779	9/22	,158	,035	,028	0,221	19/14
	%	65,3	24,8	9,9	100	8,66	71,5	15,8	12,7	100	1,16
BA	g/kg	,487	,251	,113	0,851	15/19	,183	,035	,046	0,264	23/25
	%	57,2	29,5	13,3	100	5,67	69,3	13,3	17,4	100	1,15
CbG	g/kg	,727	,260	,208	1,195	13/28	,157	,088	,048	0,293	15/20
	%	60,8	21,8	17,4	100	9,19	53,6	30,0	16,4	100	1,95
CiA	g/kg	,599	,191	,139	0,929	13/26	,174	,077	,071	0,322	10/19
	%	64,5	20,5	15,0	100	7,14	54,0	23,9	22,1	100	3,22
en-dehors de le houppier											
ASy	g/kg	,351	,031	,044	0,426	16/29	,105	,013	,014	0,132	25/16
	%	82,4	7,3	10,3	100	2,66	79,5	9,9	10,6	100	0,53
ASn	g/kg	,253	,040	,054	0,347	16/25	,114	,025	,027	0,166	14/27
	%	72,9	11,5	15,6	100	2,17	68,7	15,0	16,3	100	1,19
ScB	g/kg	,298	,066	,068	0,432	11/23	,107	,013	,039	0,159	17/25
	%	69,0	15,3	15,7	100	3,93	67,3	8,18	24,5	100	0,94
BA	g/kg	,570	,052	,043	0,665	15/18	,157	,011	,016	0,184	14/18
	%	85,7	7,8	6,5	100	4,43	85,3	6,0	8,7	100	1,31
CbG	g/kg	,534	,171	,120	0,825	7/25	,163	,033	,024	0,220	7/15
	%	64,7	20,7	14,6	100	11,8	74,1	15,0	10,9	100	3,14
CiA	g/kg	,580	,107	,115	0,802	7/27	,140	,068	,088	0,296	15/27

	%	72,3	13,4	14,3	100	11,5	47,3	23,0	29,7	100	1,97
--	---	------	------	------	-----	------	------	------	------	-----	------

m.o. : matière organique totale - première valeur telle que déterminée à l'AB-DLO/Haren - seconde valeur telle que déterminée au Laboratoire des Sols / Sotuba

% : matière organique grossière en tant que pourcentage de la matière organique totale telle que fixée à l'AB-DLO/Haren

l : fraction légère

m : fraction de poids moyen

h : fraction lourde

Tableau II.3.6 : Facteurs d'accroissement de la matière (des fractions) organique grossière(s) sous les arbres par comparaison à l'extérieur des arbres.

	0 - 20 cm				20 - 50 cm			
espèce	total	léger	moyen	lourd	total	léger	moyen	lourd
ASY	2,7	2,5	5,5	2,2	5,0	4,8	8,5	3,2
ASn	3,6	3,5	5,1	2,9	3,0	3,0	3,6	2,3
ScB	1,8	1,7	2,9	1,1	1,4	1,5	2,7	0,7
BA	1,3	0,9	4,8	2,6	1,4	1,2	3,2	2,9
CbG	1,4	1,4	1,5	1,7	1,3	1,0	2,7	2,0
CiA	1,2	1,0	1,8	1,2	1,2	1,2	1,1	0,8

II.4. Evaluation de la redistribution des ressources et concurrence par étude des systèmes racinaires structuraux

II.4.1. Introduction

Un enracinement étendu en surface peut provoquer la redistribution de l'eau et des éléments nutritifs à partir d'une large zone autour de l'arbre, jusqu'à une petite zone sous l'arbre. De la sorte, l'enrichissement sous l'arbre peut se faire au dépens de la large zone située autour de l'arbre.

Les recherches suivantes concernant les systèmes d'enracinement structuraux de trois espèces visaient à évaluer l'importance de i) la redistribution de l'eau et éléments nutritifs, et ii) la concurrence établie avec la strate herbacée.

Un système d'enracinement est constitué de racines structurales relativement constantes (2 mm), de racines nourricières ou fines racines (1-2 mm), de très fins poils radiculaires et de mycorhizes.

Autrefois, on supposait que les plantes ligneuses des régions semi-arides avaient des racines qui s'enfonçaient profondément, avec peu de racines superficielles. Il fut reconnu plus récemment que le contraire est souvent vrai. Les arbres des régions semi-arides ont un système racinaire à double morphologie avec une matrice étendue et peu profonde s'étendant fréquemment bien en-dehors de la houppier, et une racine pivotante en profondeur (Rutherford - 1983 ; [Bremner & Kessler - 1995](#)).

Les systèmes racinaires structuraux diffèrent selon les espèces. L'enracinement en profondeur semble être plus important pour les espèces à feuillage (semi)-persistant que pour les arbres dont les feuilles tombent au début de la saison sèche - le premier groupe requérant de l'eau durant la saison sèche. Les systèmes racinaires diffèrent aussi d'un sol à l'autre. Dans des sols à texture fine, les systèmes racinaires sont moins profonds tandis que dans les sols à texture grossière, ils suivent la limite d'infiltration de l'eau (Bremner & Kessler - 1995).

La redistribution par des matrices étendues en surface peut constituer un processus lent, du fait de la large concurrence de la strate herbacée avec une matrice de racines fines 10 à 100 fois plus dense ([Bremner & Kessler - 1995](#)). De par cette forte concurrence, les racines de l'arbre semblent occuper des couches superficielles quelque peu plus profondes. Dans le cas des cultures avec une structure racinaire ressemblant plus à celle des arbres, l'aspect concurrentiel peut être différent, ainsi qu'en ont conclu Jonsson *et al.* (1988) pour le maïs sous les arbres, où la densité des racines fines des arbres sur le premier mètre était deux fois aussi élevée que pour le maïs.

II.4.2. Matériels et méthodes

L'architecture du système racinaire structural a été étudiée par extraction d'un demi-cercle d'un rayon de 2 mètres jusqu'au niveau de profondeur atteint par les plus profondes racines.

La racine latérale du plus grand diamètre proche du tronc fut extraite jusqu'à son extrémité pour avoir une idée de la surface exploitée par les racines latérales de l'arbre. La structure d'enracinement fut dessinée.

Ceci fut fait pour un arbre de chacune des espèces suivantes : *Acacia senegal*, *Balanites aegyptiaca*, *Commiphora africana* et *Combretum ghasalense*. Pour pouvoir étudier la densité et la profondeur des racines dans la couche superficielle du sol, un demi-cercle ($r = 2$ m) des premiers 30-50 cm fut extrait pour deux autres arbres de chaque espèce. Les *Sclerocarya birrea* et *Acacia seyal* sont examinés de la même façon que A. Soumaré (1993), pour 5 arbres de chaque espèce. Je terminerai avec les conclusions tirées pour ses arbres-ci.

II.4.3. Résultats

Le tableau II.4.1 donne la longueur/l'extension moyenne et la profondeur des racines latérales, la profondeur des racines pivotantes et d'autres, ainsi que la densité de la matrice racinaire superficielle ($> 0,5$ cm), pour un demi-cercle autour du tronc.

Pour illustrer ce dernier aspect, les figures [II.4.1a](#)- [II.4.2a](#) -[II.4.3a](#)-[II.4.4a](#) - [II.4.5a](#)-[II.4.6a](#) montrent les représentations du système d'enracinement structural sur les premiers 30/40 cm du sol, sur un demi-cercle ($r = 2$ m) autour du tronc. On voit que d'une espèce à l'autre, il existe une différence de densité et de profondeur en ce qui concerne les systèmes racinaires superficiels.

Sur le *Balanites aegyptiaca*, la densité de la matrice racinaire superficielle est faible, et ces racines-là s'épaississent progressivement vers leurs extrémités, pas au-delà de 10 m à partir du tronc.

La densité est au plus haut sur le *Commiphora africana* et le *Combretum ghasalense* - les racines du Commiphora sont très peu profondes (10-20 cm) et celles du Combretum le sont quelque peu plus (30-40 cm). Outre cette couche-là, un Combretum âgé a une autre couche d'environ 20 cm de profondeur - comme le montre la [figure II.4.2c](#) -, constituée de racines quelque peu plus fines.

La matrice racinaire superficielle de l'*Acacia senegal* est de même peu profonde (10-20 cm) et tout à fait dense, tout particulièrement autour du tronc où il présente moult racines latérales fines.

La densité de la matrice superficielle des racines du *Sclerocarya birrea* et de l'*Acacia seyal* est peu ou prou inférieure.

Les figures [II.4.1b](#)- [II.4.2b](#) -[II.4.3b](#)-[II.4.4b](#) - [II.4.5b](#)-[II.4.6b](#) font apparaître les représentations verticales des systèmes racinaires structuraux dans un creux d'un demi-cercle ($r=2$ m) sur la profondeur d'une racine pivotante d'arbre. La [figure II.4.7](#) montrent les représentations de ces systèmes pour tous les arbres, en tant qu'interprétation visuelle à partir de l'excavation de racines pivotantes et latérales.

Les *Acacias* ont le système racinaire à double morphologie le plus net : d'une part une matrice superficielle, d'autre part un pivot profond dont la taille décroît progressivement en profondeur. Cette illustration est semblable à celle du *Commiphora africana* et *Sclerocarya birrea*, mais leur pivot est court.

Le *Combretum ghasalense* présente une structure racinaire utilisant plus de la totalité du volume du sol, au moins jusqu'à 1,2 m de profondeur. Je ne suis pas sûre néanmoins que cet arbre soit représentatif de l'espèce, étant donné qu'un *Sclerocarya birrea* âgé a la même illustration, avec un pivot diminuant largement sur le premier mètre en raison de nombreuses gros branchages, tandis que le branchage des plus petits était bien moindre et que les racines latérales ne restaient pas en profondeur (Soumaré - commentaire personnel).

Le *Balanites aegyptiaca* présente un système racinaire qui a le moins de racines superficielles et un pivot peu profond. La forme et la matière des racines du *Balanites* sont très différentes des autres : non arrondies, se cassant facilement et présentant une structure spongieuse à l'intérieur.

II.4.4. Discussion

La forme et l'étendue du système racinaire structural indiquent principalement quel volume de sol l'arbre utilise pour en extraire les ressources, et s'il y a concurrence avec la strate herbacée.

Il est impossible de connaître l'étendue de cette concurrence de cette façon-là, étant donné qu'il faut connaître la densité de la racine nourricière fine et l'extension des mycorhizes. [Bremen & Kessler \(1995\)](#) indiquent que la concurrence des arbres avec la strate herbacée n'est pas intense, étant donné que le premier groupe a des densités d'enracinement 10 à 100 fois inférieures au dernier groupe (sur des sols de texture fine et grossière respectivement). Selon le système racinaire structural, le *Balanites aegyptiaca* établit le moins de concurrence avec la strate herbacée puisqu'il n'a que quelques racines superficielles qui ne s'étendent pas très loin et s'enfoncent progressivement sur 1,5-2 m de profondeur. D'après [Bremen & Kessler \(1995\)](#), on s'attend à ce que les arbres à feuillage (semi)-persistant disposent d'un système racinaire plus extensif en profondeur, afin de répondre aux besoins de l'arbre en saison sèche. Cependant - bien que le *Balanites* soit un arbre à feuillage semi-persistant ayant le moins de feuilles en Février/Mars (Hiernaux *et al.* - 1992), ses pivot et autres racines n'excèdent pas 3 m en profondeur, et tout le système racinaire ne s'étend guère. Il convient probablement d'en rechercher l'explication dans la physiologie de l'arbre, dans ses caractéristiques d'utilisation de l'eau et le fonctionnement de ses racines comportant à l'intérieur cette étrange matière spongieuse.

L'autre extrême parmi les six espèces d'arbres est le *Sclerocarya birrea*, avec son pivot court et un système racinaire superficiel extensif. Cela peut signifier qu'il entre en compétition avec la strate herbacée sur une large zone, bien que cette concurrence ne soit pas très intense du fait que ses racines superficielles sont assez profondes. Les accroissements possibles de la fertilité du sol sous l'arbre - par comparaison à l'extérieur - peuvent provenir principalement de la redistribution aux dépens d'une large zone située à l'extérieur de l'arbre.

Le volume de sol exploité par les racines du *Commiphora africana* semble être le plus petit, laissant à penser qu'un processus d'enrichissement du sol sous l'arbre sera très difficile ou très lent. La densité des racines superficielles est forte, et elles sont vraiment superficielles, indiquant une concurrence relativement importante des racines de l'arbre avec celle de la strate herbacée, sur un cercle d'un rayon de 5 m autour de l'arbre.

La racine pivotante peu profonde des *Sclerocarya birrea* et du *Commiphora africana* va de pair avec leurs besoins. Ce sont des arbres qui perdent leurs feuilles à la fin de la saison des pluies.

C'est le *Combretum ghasalense* qui paraît exploiter le plus complètement le sous-sol, avec un pivot qui s'infléchit et qui est relativement profond, des pivots secondaires, des racines latérales qui s'enfoncent et des racines latérales assez profondes (0,5-1 m). La matrice superficielle de la racine est également dense mais profonde.

Cette illustration peut indiquer que cet arbre tire plus de ses ressources des couches situées au-dessous de la couche supérieure, et donc ne rentre pas beaucoup en compétition avec la strate herbacée. Cela peut vouloir indiquer aussi qu'un enrichissement sous l'arbre est possible, puisque l'arbre rassemble et fait circuler en partie les ressources extraites à partir d'un large volume de sol. Ce système racinaire large, et particulièrement les racines plus profondes, peuvent aussi couvrir les besoins de l'arbre en période sèche, puisque la chute des feuilles survient tardivement.

Les *Acacias* ont la plus nette structure racinaire à double morphologie : une matrice superficielle extensive et un pivot relativement profond. Pour l'*Acacia seyal*, le composant vertical est quelque peu plus étendu : des pivots plus profonds et présence de pivots secondaires se ramifiant vers le bas à partir des racines latérales.

En ce qui concerne l'*Acacia senegal*, le composant horizontal est quelque peu plus étendu : une matrice superficielle plus dense autour du tronc tout particulièrement, s'étendant un peu plus loin. La matrice racinaire superficielle extensive et peu profonde de l'*A. senegal* peut signifier : i) qu'il y a redistribution en vue d'enrichir le sol sous l'arbre puisque une partie assez importante des ressources puisées par l'arbre provient d'une large zone située autour de l'arbre, ii) que l'arbre entre en concurrence avec la strate herbacée, au niveau des ressources. La matrice peu profonde et dense sous la frondaison peut établir une forte concurrence avec la croissance des herbes de cette zone.

L'aspect concurrentiel peut jouer un rôle quelque peu moindre sous et autour de l'*A. seyal*, et l'arbre peut puiser une partie légèrement plus importante de ses ressources des couches plus profondes du sol, bien que cette fraction soit faible au total par comparaison à la fraction provenant de la large zone superficielle.

Tableau II.4.1 : Longueur, profondeur et densité des racines structurales.

	ASn	ASy*	ScB*	BA	CbG	CiA
longueur de la racine latérale (m)	25	20	40	10	25	5
profondeur de la racine latérale (cm)	10-20			20-150	20-30*	10
profondeur de la racine pivotante (m)	4	6	2,5	3	4,5	2
profondeur de la pivot secondaire (m)	---	2		---	2	---
profondeurs des autres racines (m)	---			2	3	2
quantité des racines lat. dans le 1/2 cercle	14	11	11	7	17	17

* données de Soumaré (1993)

pivot secondaire : verticale, se ramifiant vers le bas à partir de la racine latérale

autres racines : commençant comme des racines latérales mais s'infléchissant ensuite en profondeur.

[Figure II.4.1a : Sclerocarrya birrea.](#)

[Figure II.4.1b : Sclerocarrya birrea.](#)

[Figure II.4.2a : Combretum ghasalense.](#)

[Figure II.4.2b : Combretum ghasalense.](#)

[Figure II.4.2c : Combretum ghasalense.](#)

[Figure II.4.3a : Acacia senegal.](#)

[Figure II.4.3b : Acacia senegal.](#)

[Figure II.4.4a : *Acacia seyal*.](#)

[Figure II.4.4b : *Acacia seyal*.](#)

[Figure II.4.5a : *Balanites aegyptiaca*.](#)

[Figure II.4.5b : *Balanites aegyptiaca*.](#)

[Figure II.4.6a : *Commiphora africana*.](#)

[Figure II.4.6b : *Commiphora africana*.](#)

[Figure II.4.7](#)

[Partie II: Chapitre 5, 6 et 7,](#)

[Bibliographie,](#)

[Annexes](#)

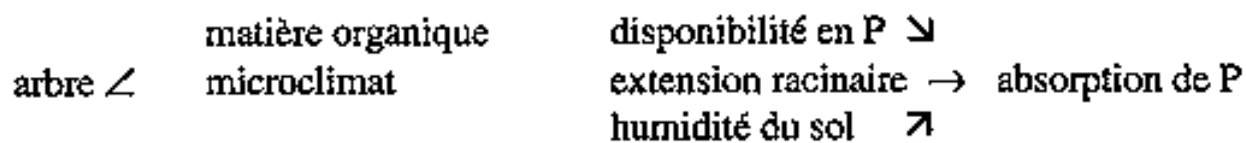


Figure I.1. Facteurs d'absorption de P et facteurs liés aux arbres, et pouvant les influencer.

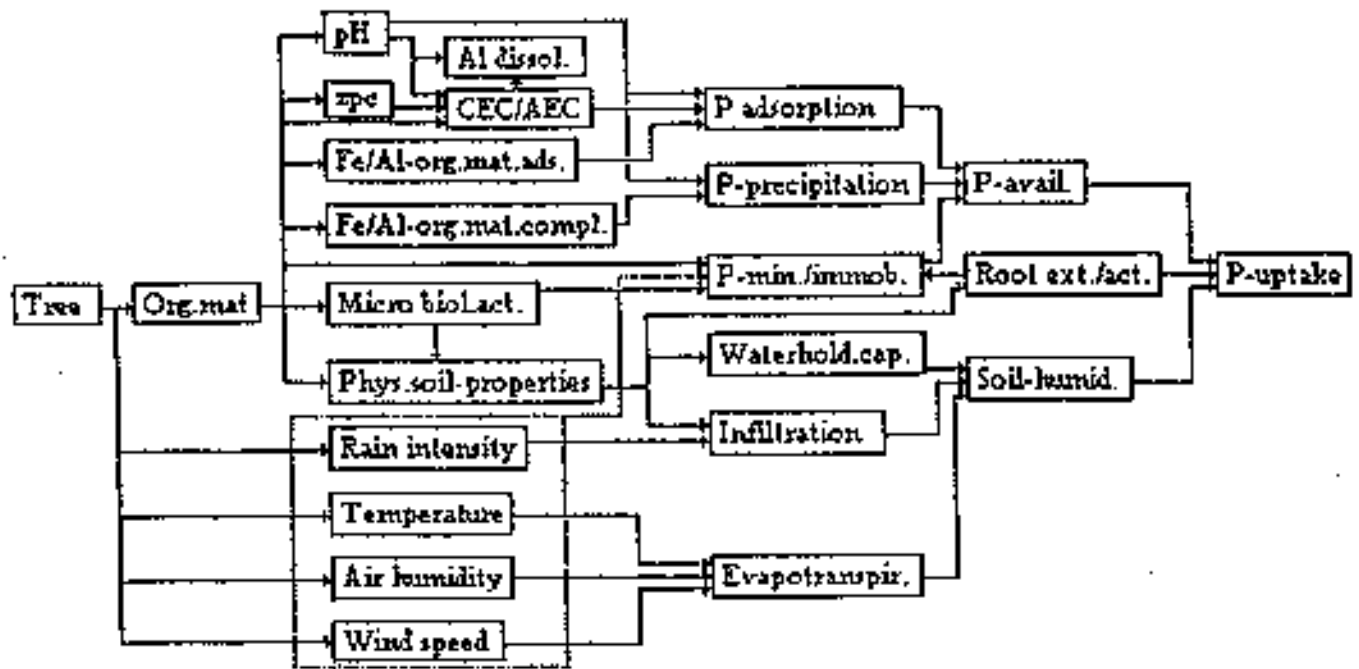


Figure 1.2.

Effets des arbres sur l'absorption de P.

(tree → arbre ; pzc → zpc ; AEC → CEA ; P-avail. → disponibilité de P ; waterhold cap. → capacité de rétention d'eau ; P-uptake → absorption de P ; phys. soil properties → propriétés physiques du sol ; rain intensity → intensité des précipitations ; soil-humid → humidité du sol ; air humidity → hygrométrie ; wind speed → vitesse du vent)

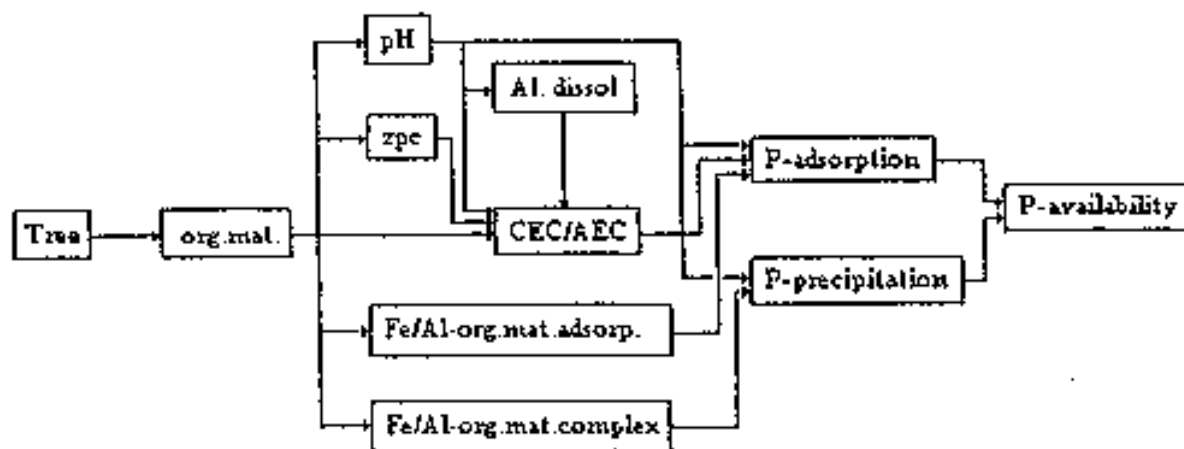


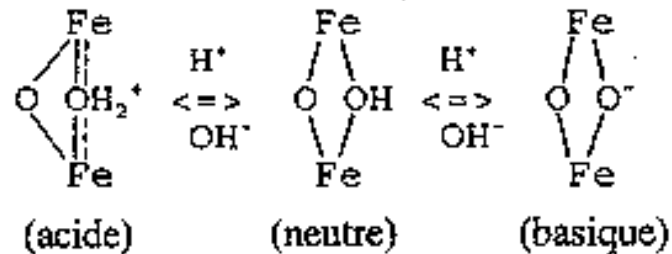
Figure I.2. Bloc A : Effets de la matière organique sur les propriétés chimiques du sol et disponibilité de phosphore.
(tree → arbre ; zpc → pzc ; AEC → CEA ; availability → disponibilité)

valeurs du point zéro de charge (pzc/pH₀)

oxydes (hydroxydes) Fe/Al ≥ 6 (Stoop - 1974 ; Stotzky dans : Huang & Schnitzer - 1986)

matière organique 3-4 (Coleman *et al.*, 1989)

mécanisme dans l'oxyde de fer :



en molécule organique : dissociation ou association de H⁺ avec des groupes carboxyliques (-COOH) ou aminés (-C-NH₂).

Figure 1.3. Valeurs du point zéro de charge et mécanisme de l'association ou dissociation de proton pour des oxydes Fe/Al et molécules organiques.

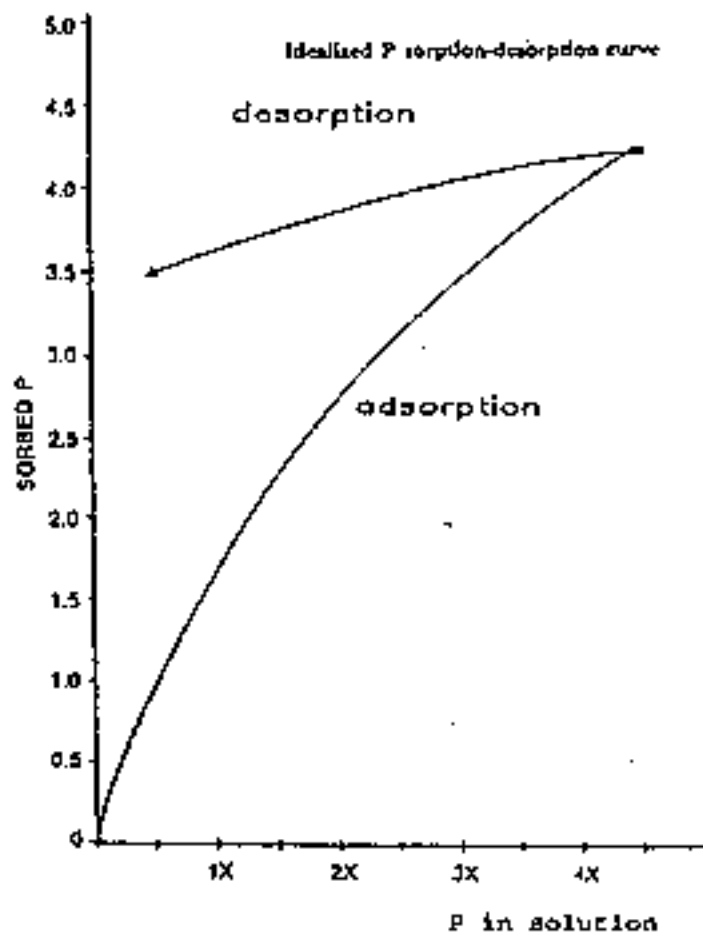


Figure I.4. *Courbes idéales d'adsorption et de désorption de phosphore.*
(sorbed P → P adsorbé ; P in solution → P en solution)

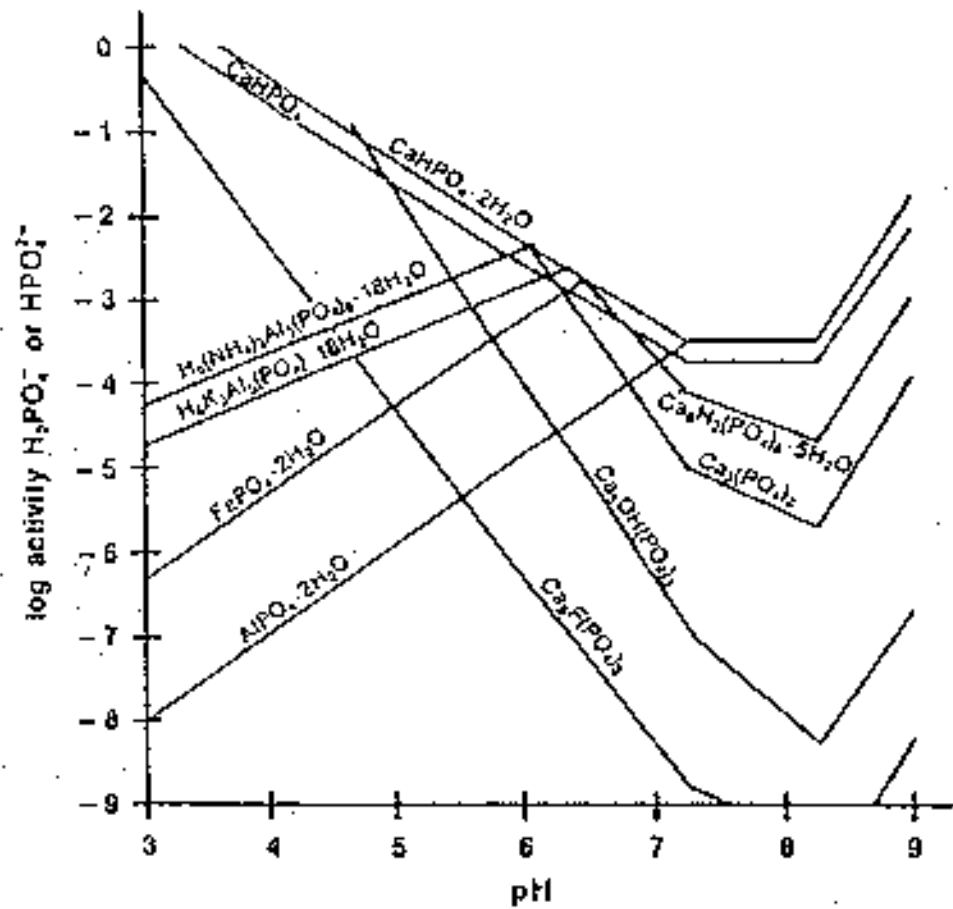


Figure 1.5. *Diagramme de précipitation/dissolution des phosphates d'Al, de Fe et de Ca (Westerman - 1990).*
(log activity → représentation logarithmique)

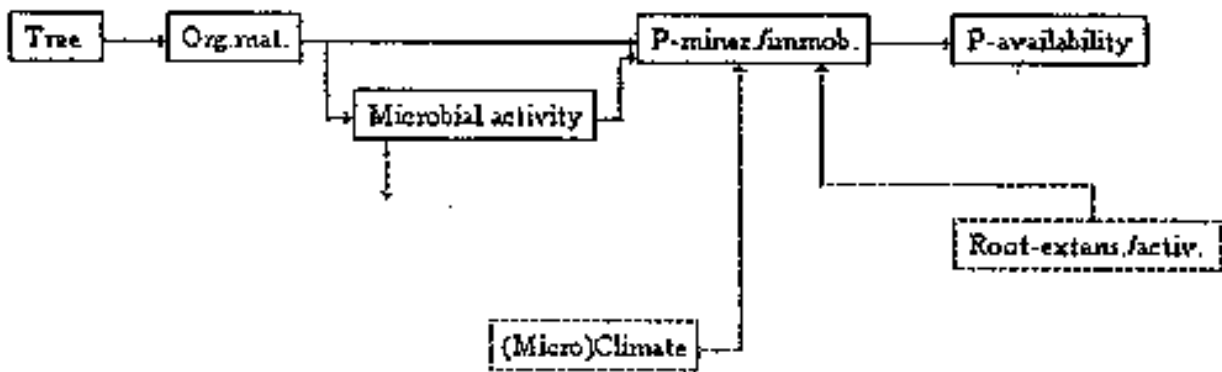


Figure 1.2. **Bloc B :** *Effets de la matière organique sur la minéralisation de P, l'activité microbienne et la disponibilité de P.*
 (tree → arbre ; availability → disponibilité)

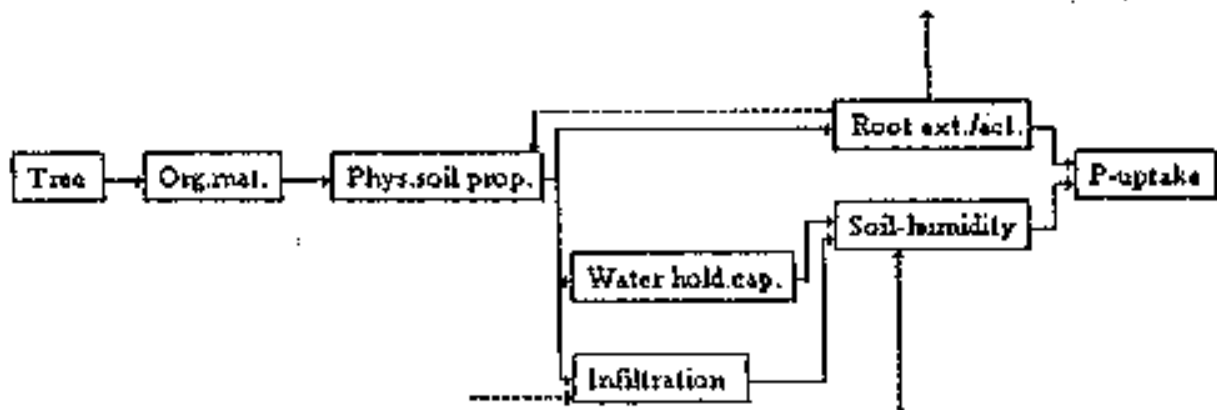


Figure I.2.

Bloc C : *Effets de la matière organique sur les propriétés physiques du sol, extension racinaire et humidité du sol.*

(tree → arbre ; P-uptake → absorption de P ; water hold cap. → capacité de rétention d'eau)

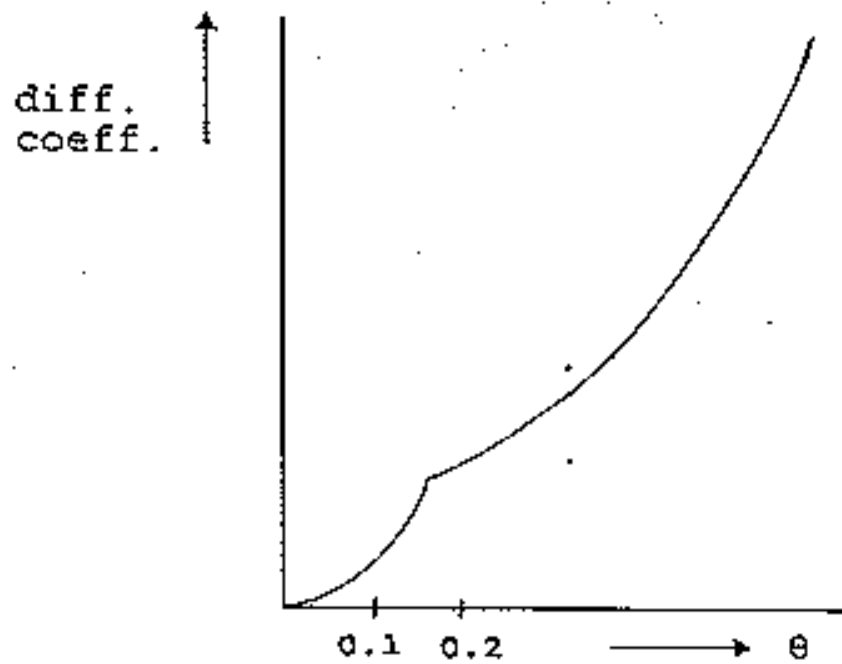


Figure I.6. *Relation entre le coefficient de diffusion du phosphore et l'humidité du sol.*
(diff. coef. → coefficient de diffusion)

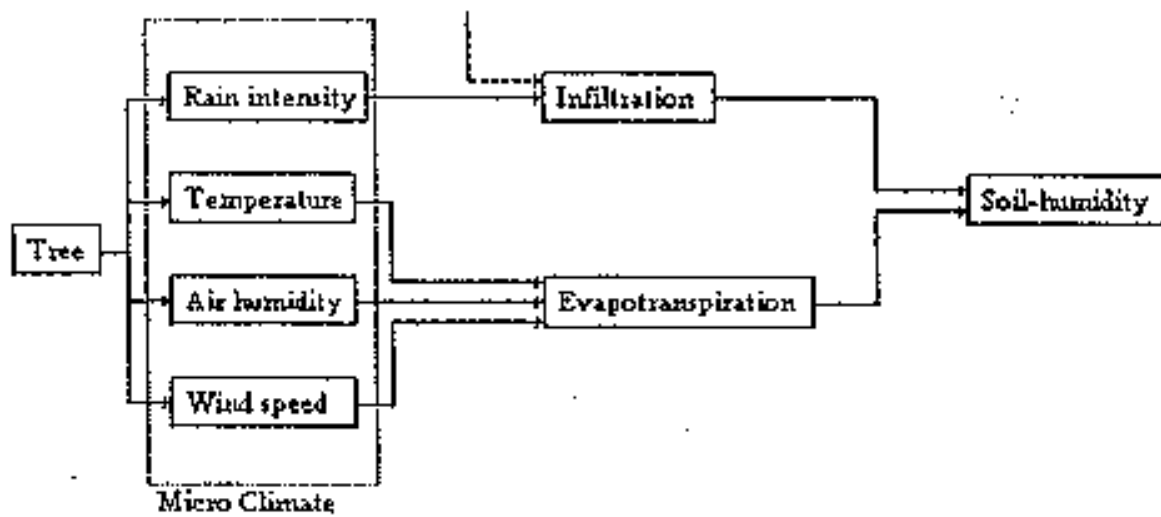


Figure I.2.

Bloc D : *Effets de l'arbre sur le microclimat et l'humidité du sol.*

(tree → arbre ; soil-humidity → humidité du sol ;

air humidity → hygrométrie ; wind speed → vitesse du vent)

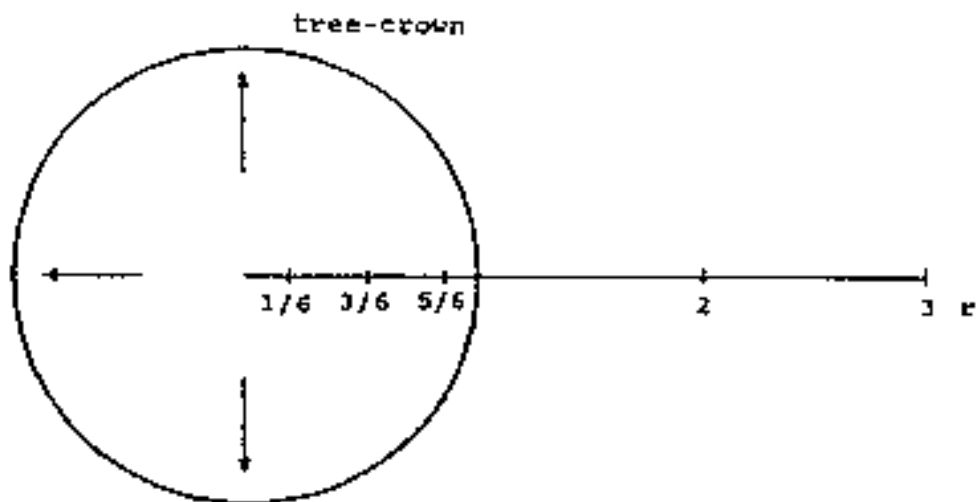


Figure II.2.1. *Points d'échantillonnage sous et en-dehors de la frondaison.*
(tree-crown = cime de l'arbre)

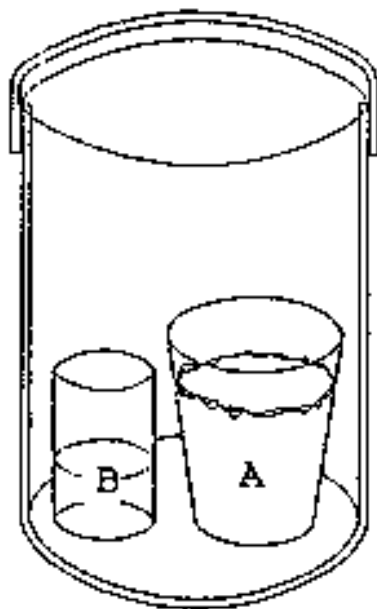
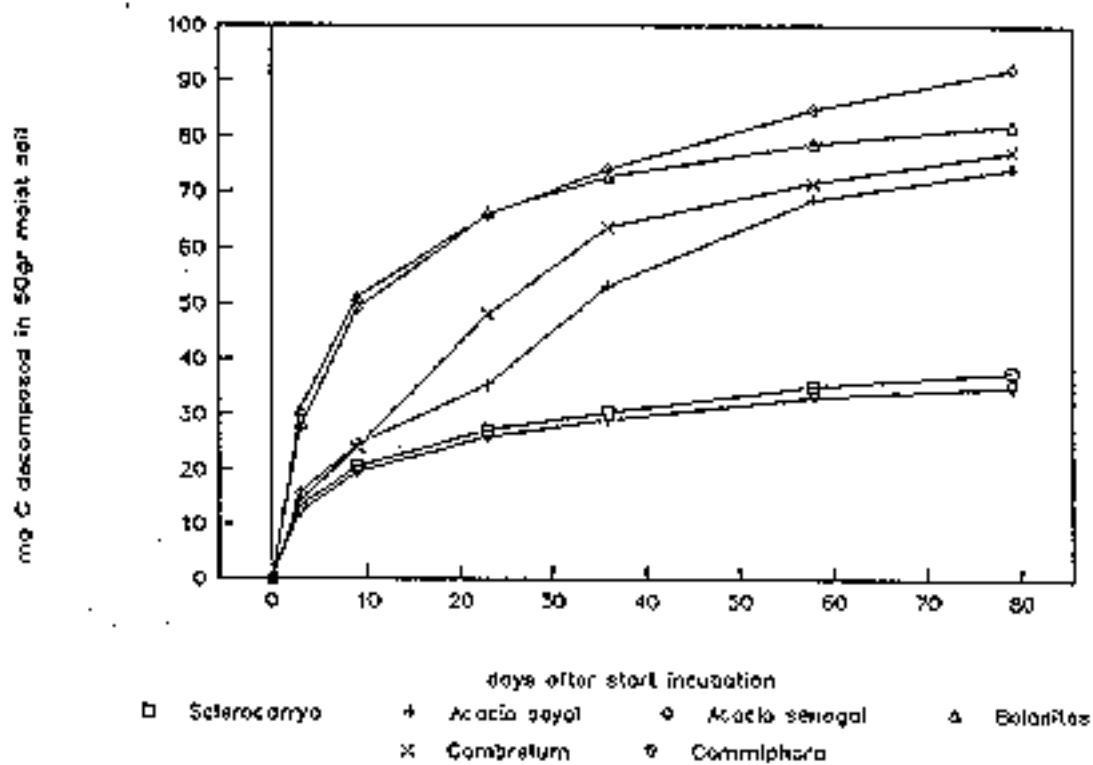


Figure II.3.1. *Réceptient en verre étanche à l'air avec des coupelles remplies de terre (A) et de NaOH (B).*

Decomposition of leaf litter



Decomposition of branch litter

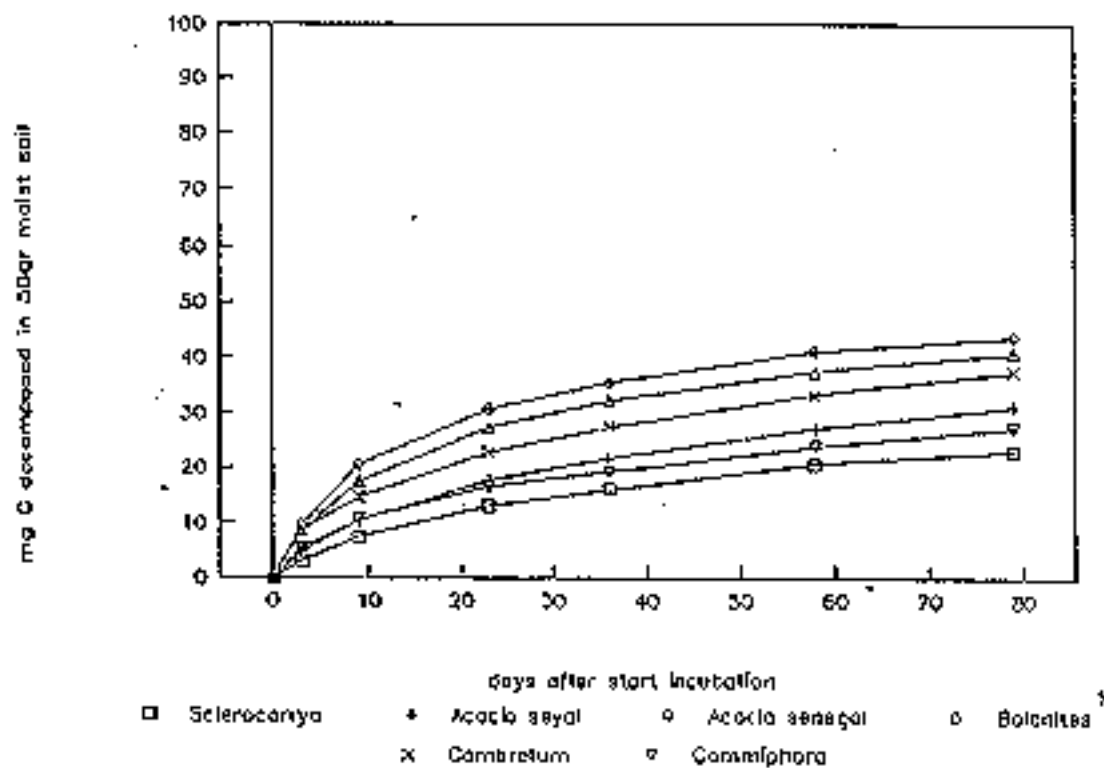


Figure II.3.2. *Décomposition de la litière de feuilles. (figure supérieure) et de branches (figure inférieure).*
 (mg C decomposed in 50 gr moist soil → mg de C décomposé dans 50 g de terre humide ; days after start incubation → ... jours après le début de l'incubation)

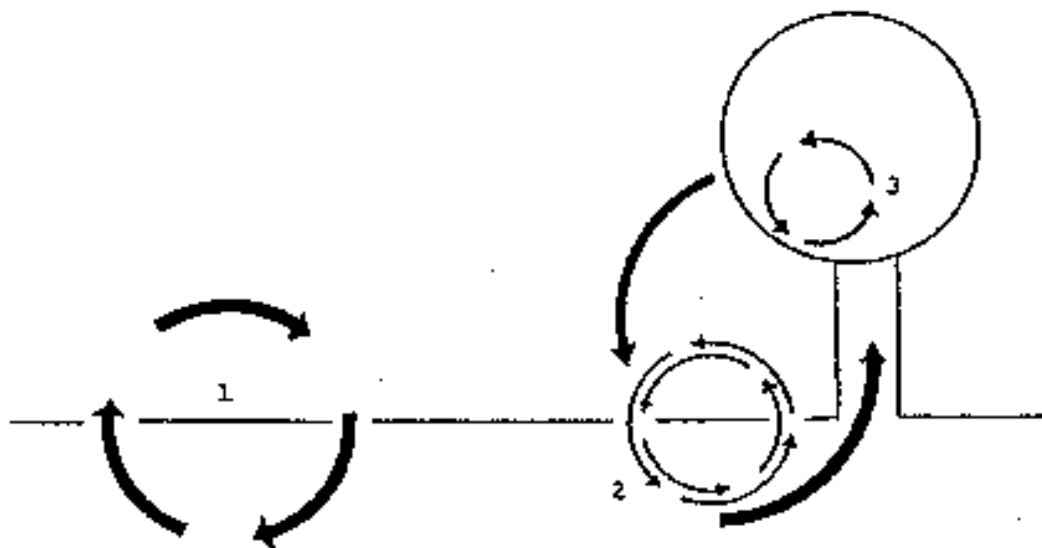


Figure II.3.3. *Cycles nutritifs au sein d'un écosystème sans et avec arbres.*
1 = *cycle nutritif avec décomposition à faible vitesse en raison de la basse qualité de la matière organique (strate herbacée)*
2 = *cycle nutritif avec vitesse de décomposition accrue en raison d'une meilleure qualité de la litière d'arbre*
3 = *cycle nutritif interne d'un arbre.*

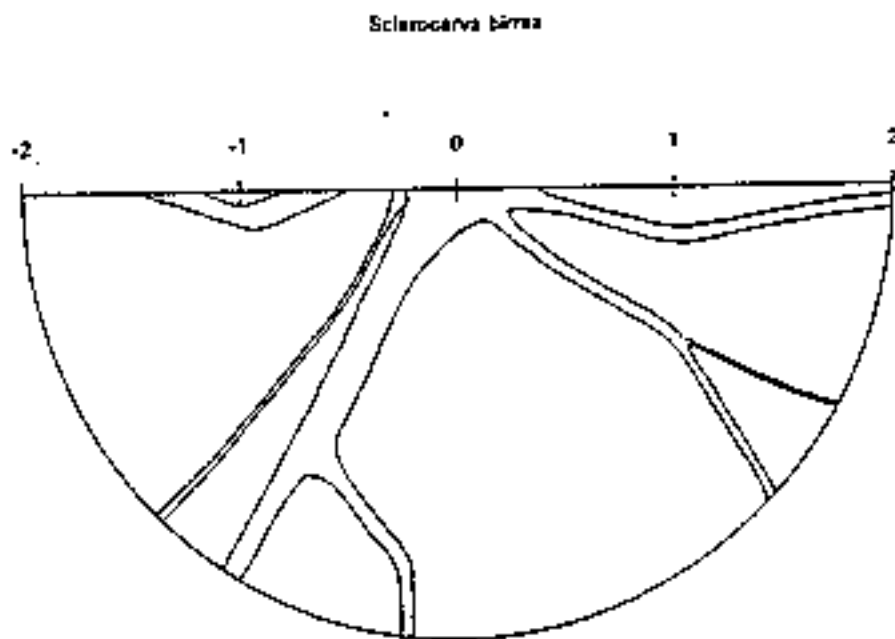


Figure II.4.1a : Sclerocarya birrea.

Combretum ghasalense

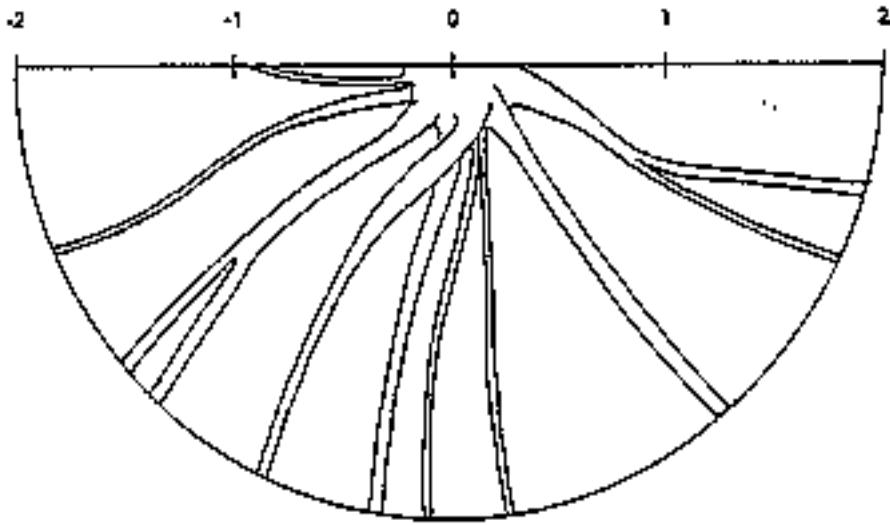


Figure II.4.2a : Combretum ghasalense.

Acacia senegal

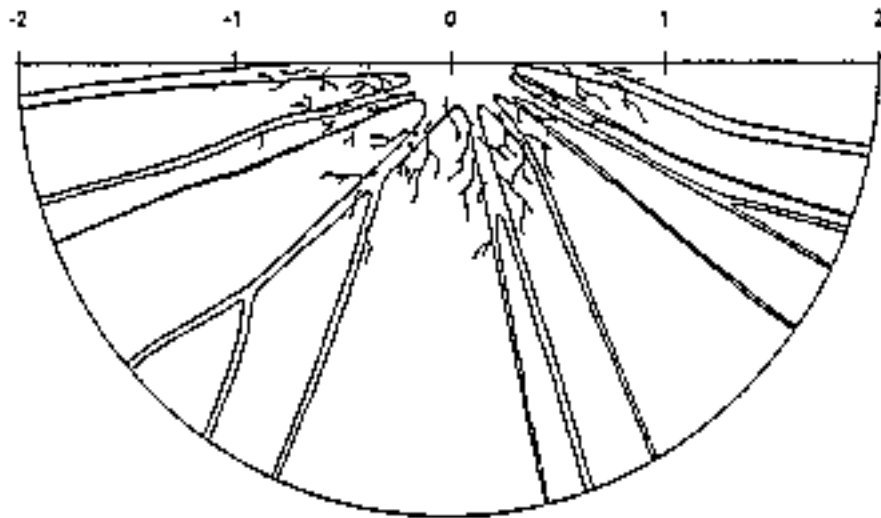


Figure II.4.3a : Acacia senegal.

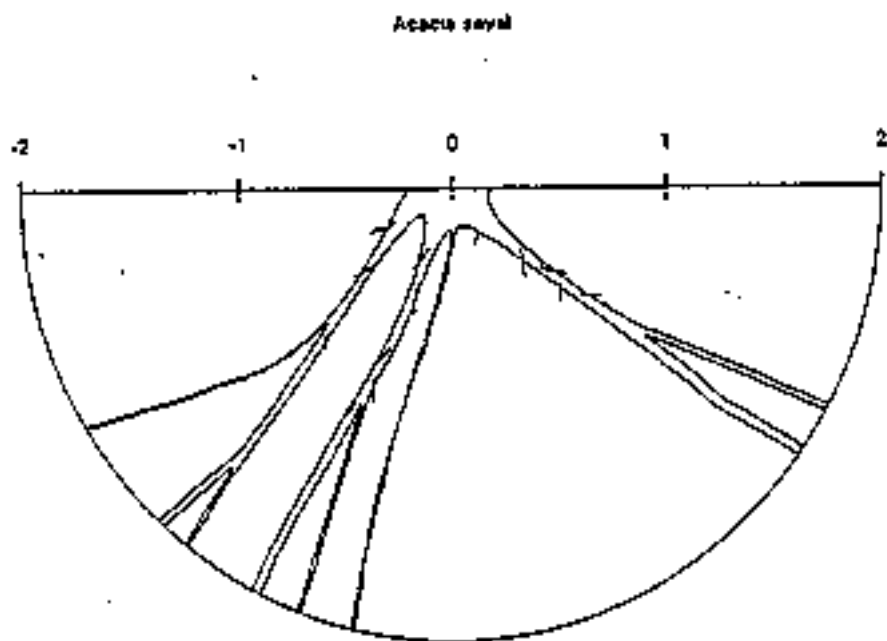


Figure II.4.4a : Acacia seyal.

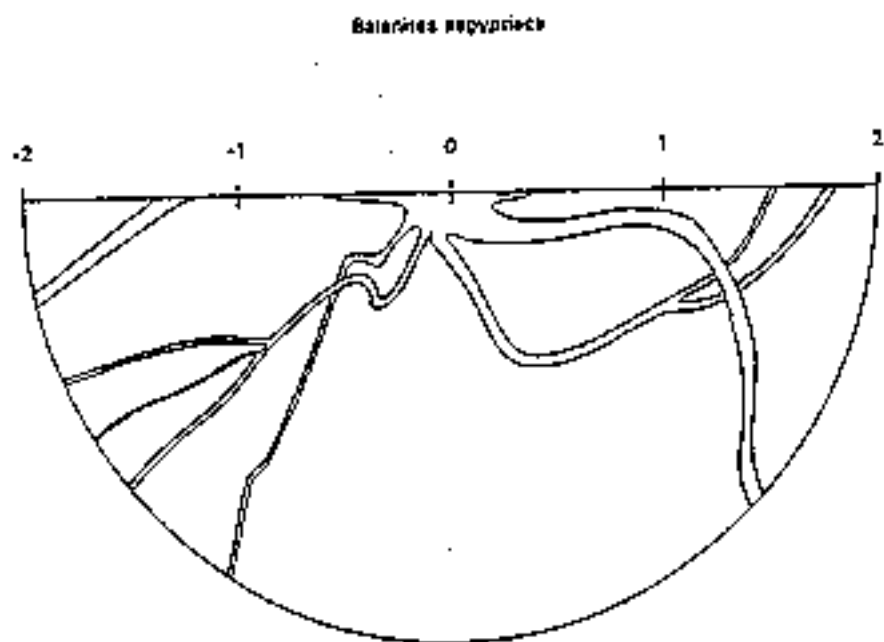


Figure II.4.5a : Balanites aegyptiaca.

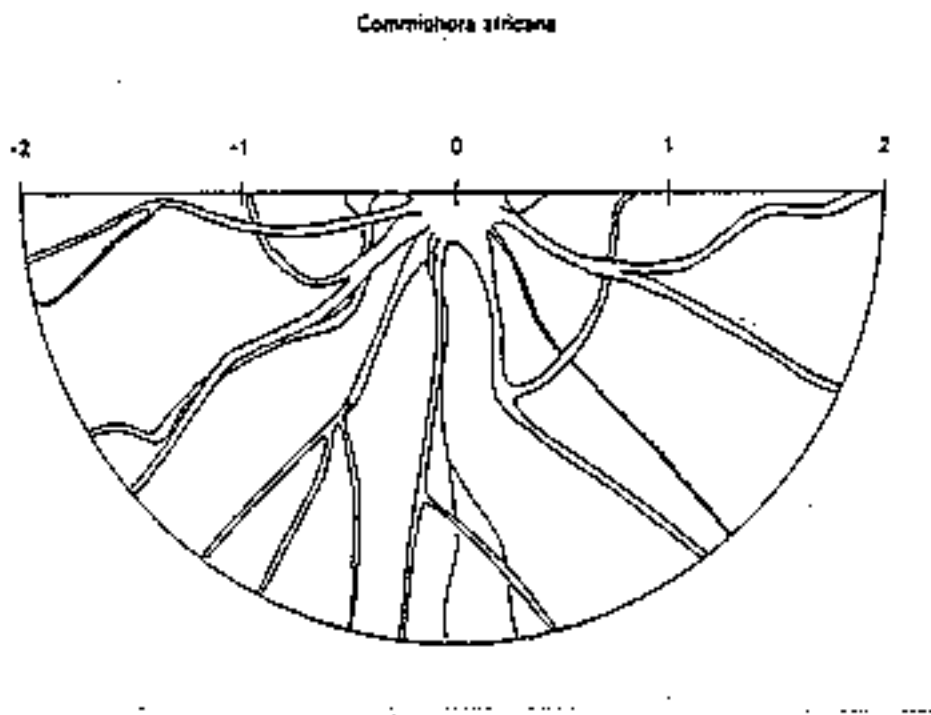


Figure II.4.6a : Commiphora africana.

Combretum ghasalense

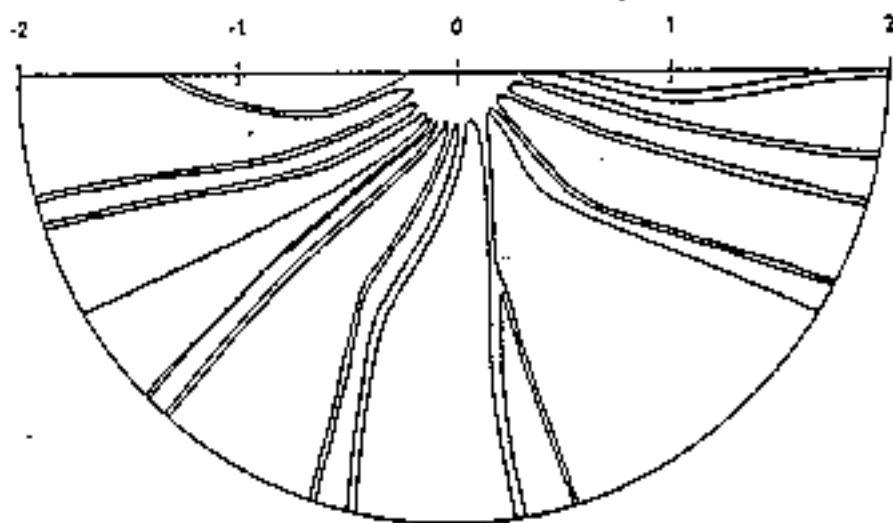


Figure II.4.2c : Combretum ghasalense.

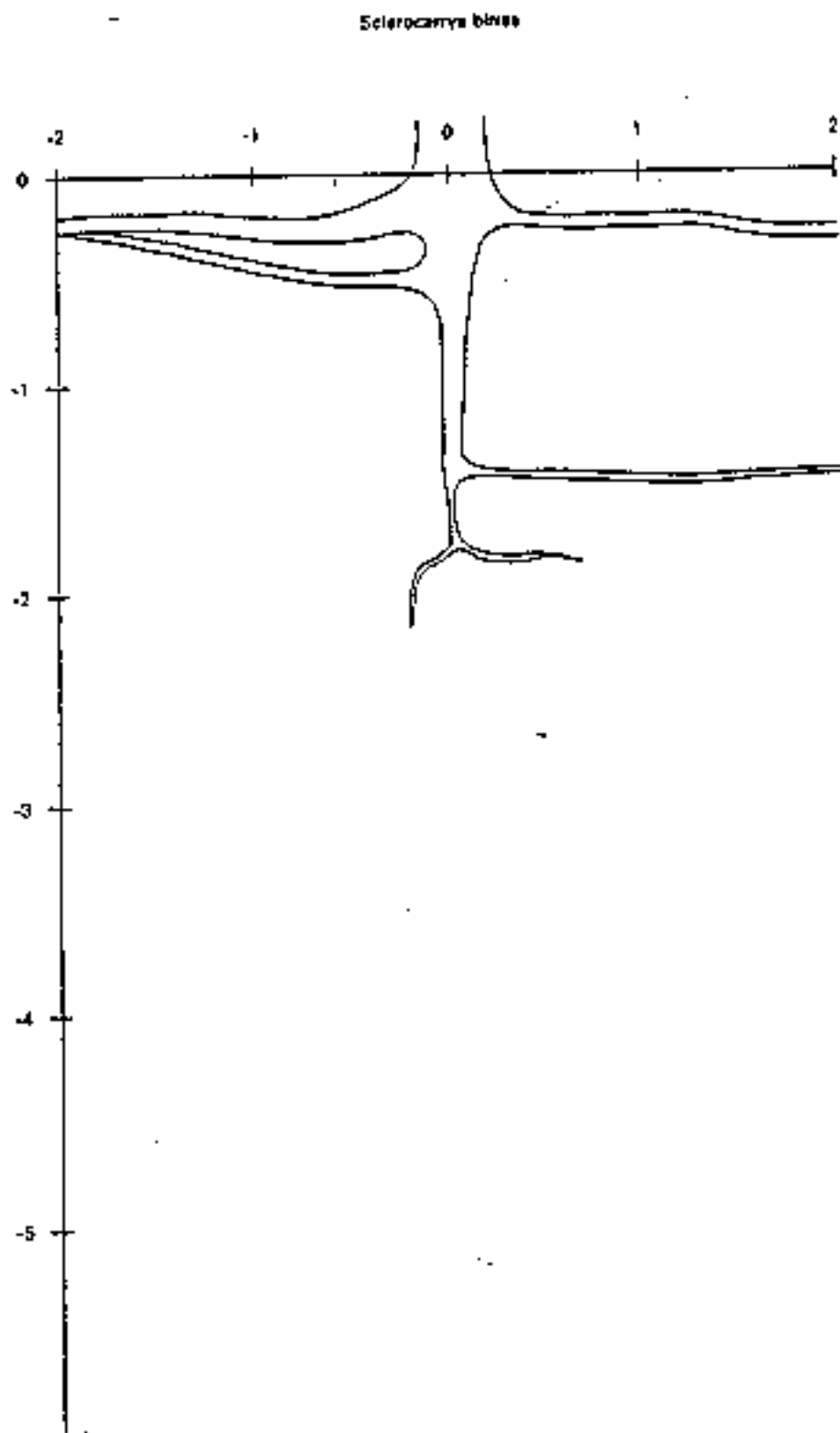


Figure 11.4.1b : *Sclerocarya birrea*.

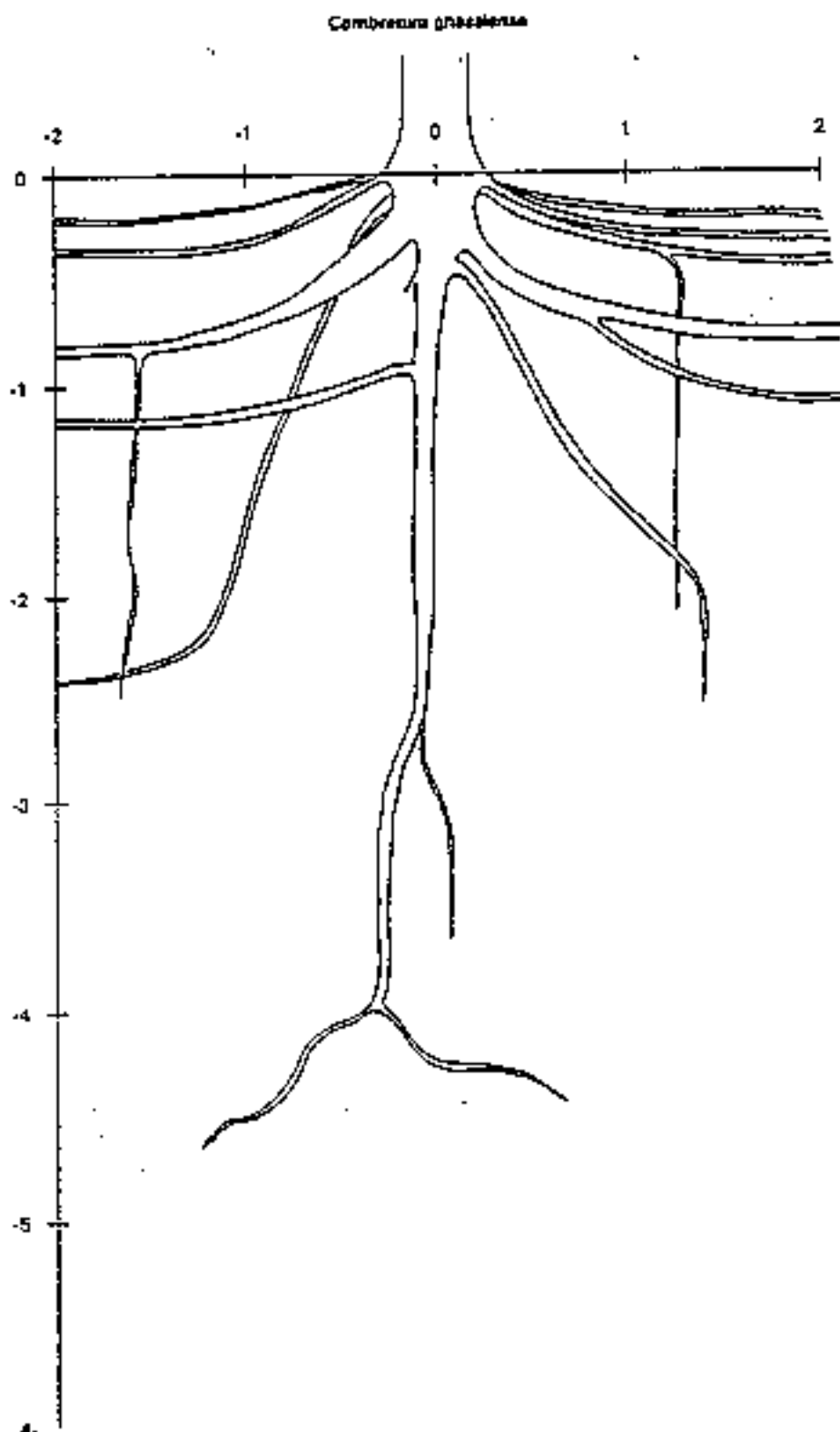


Figure II.4.2b : Combretum ghasalense.

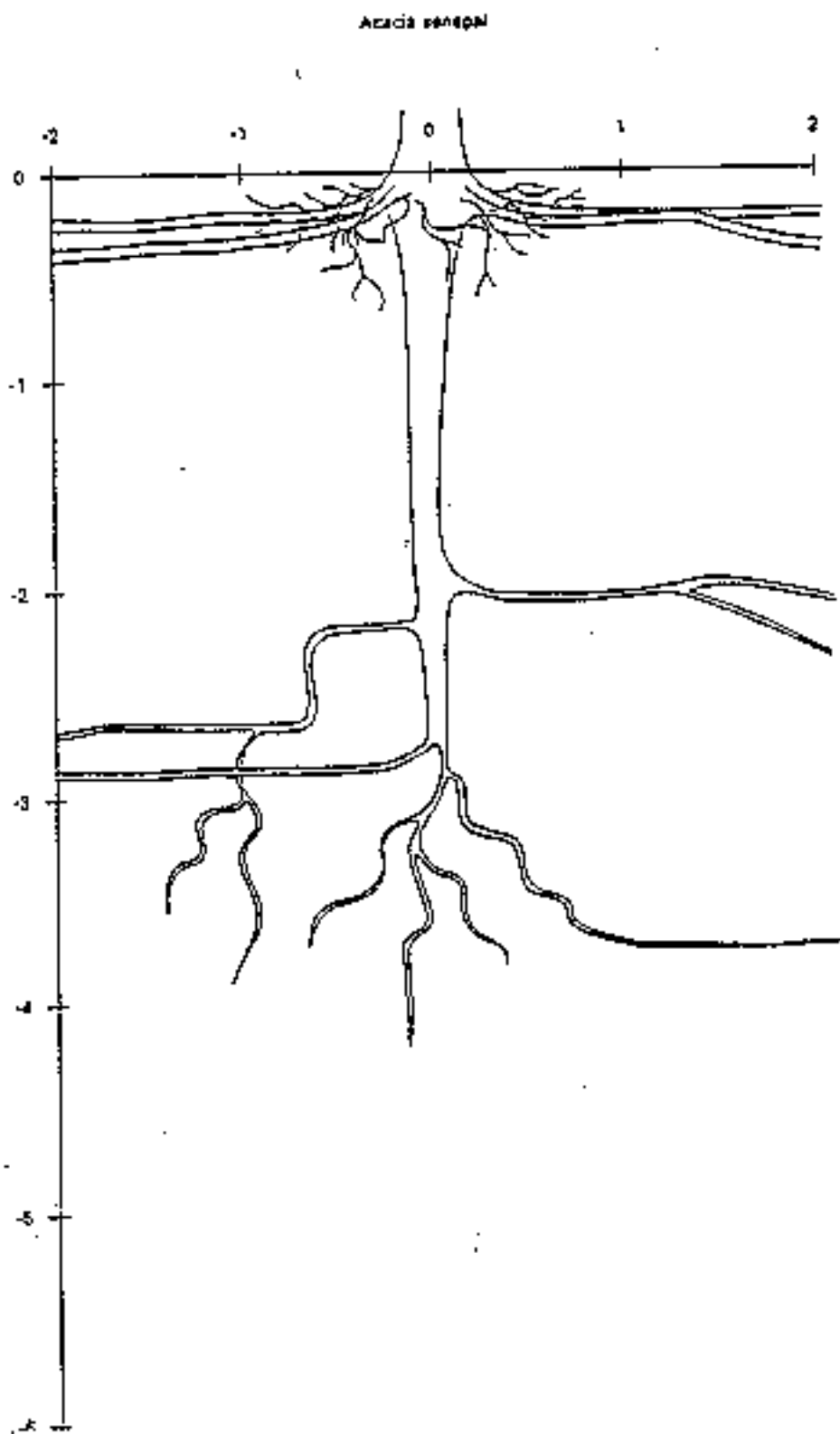


Figure II.4.3b : Acacia senegal.

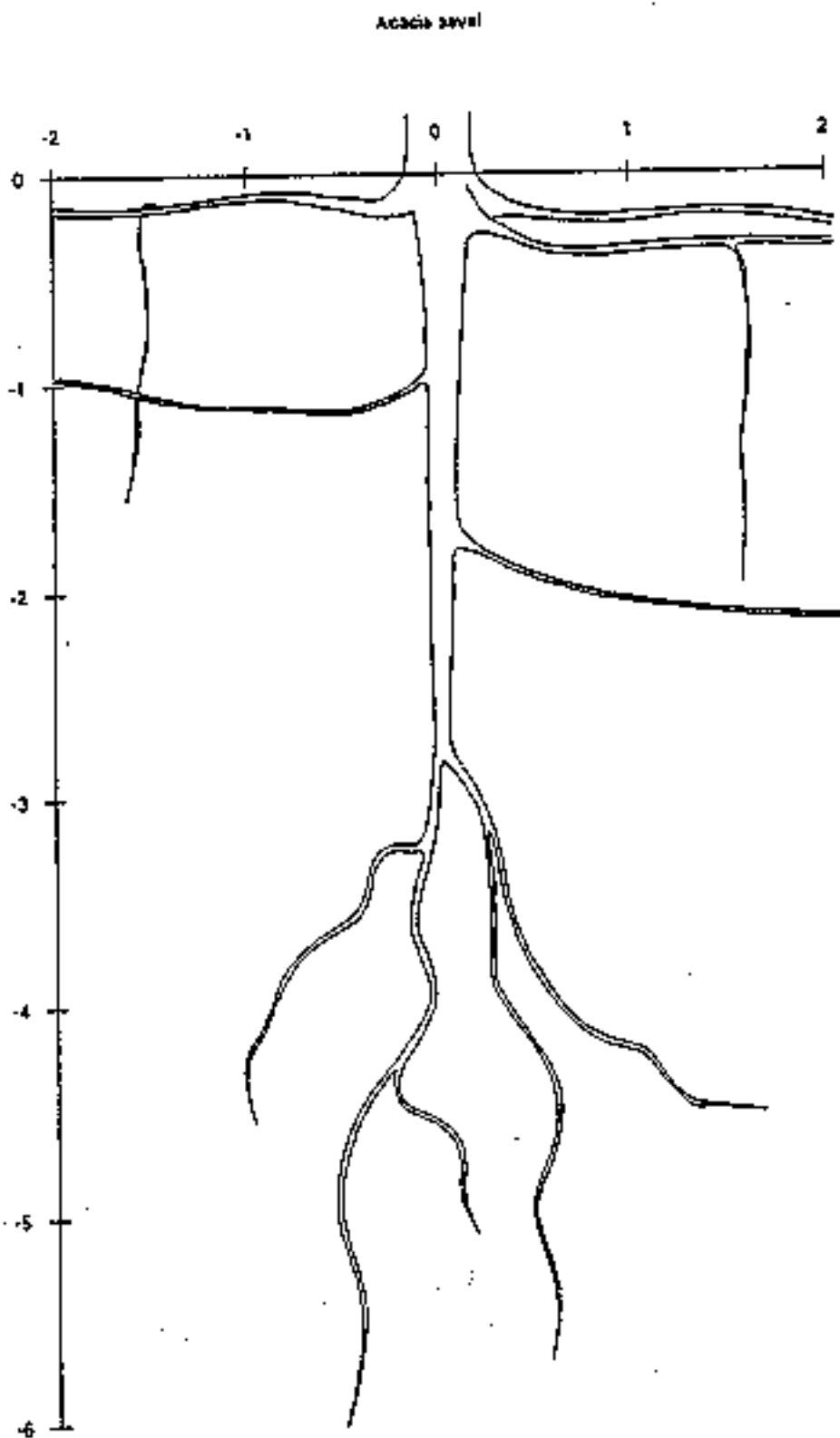


Figure II.4.4b : *Acacia seyal*.

Balanites aegyptiaca

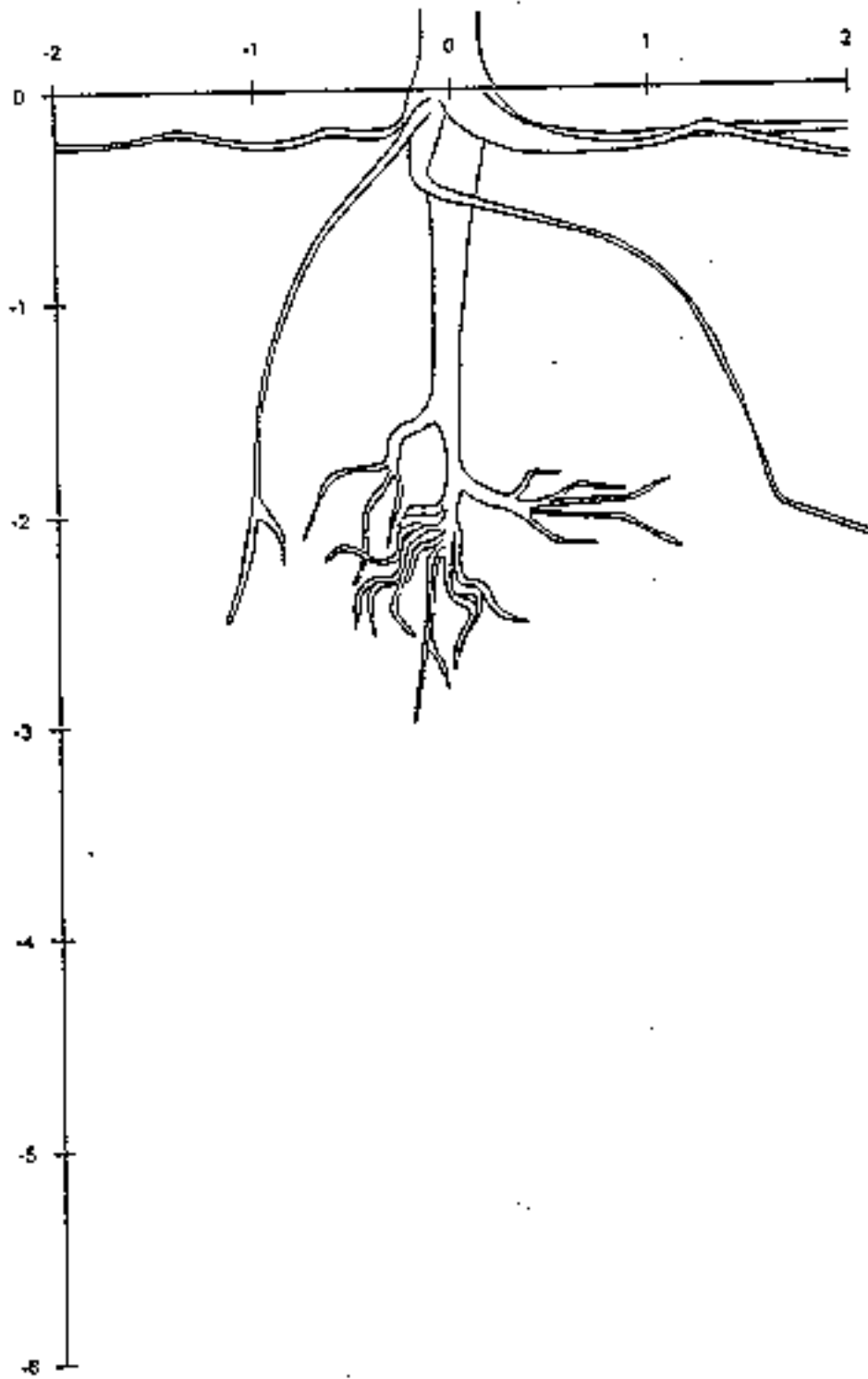


Figure Il.4.5b : Balanites aegyptiaca.

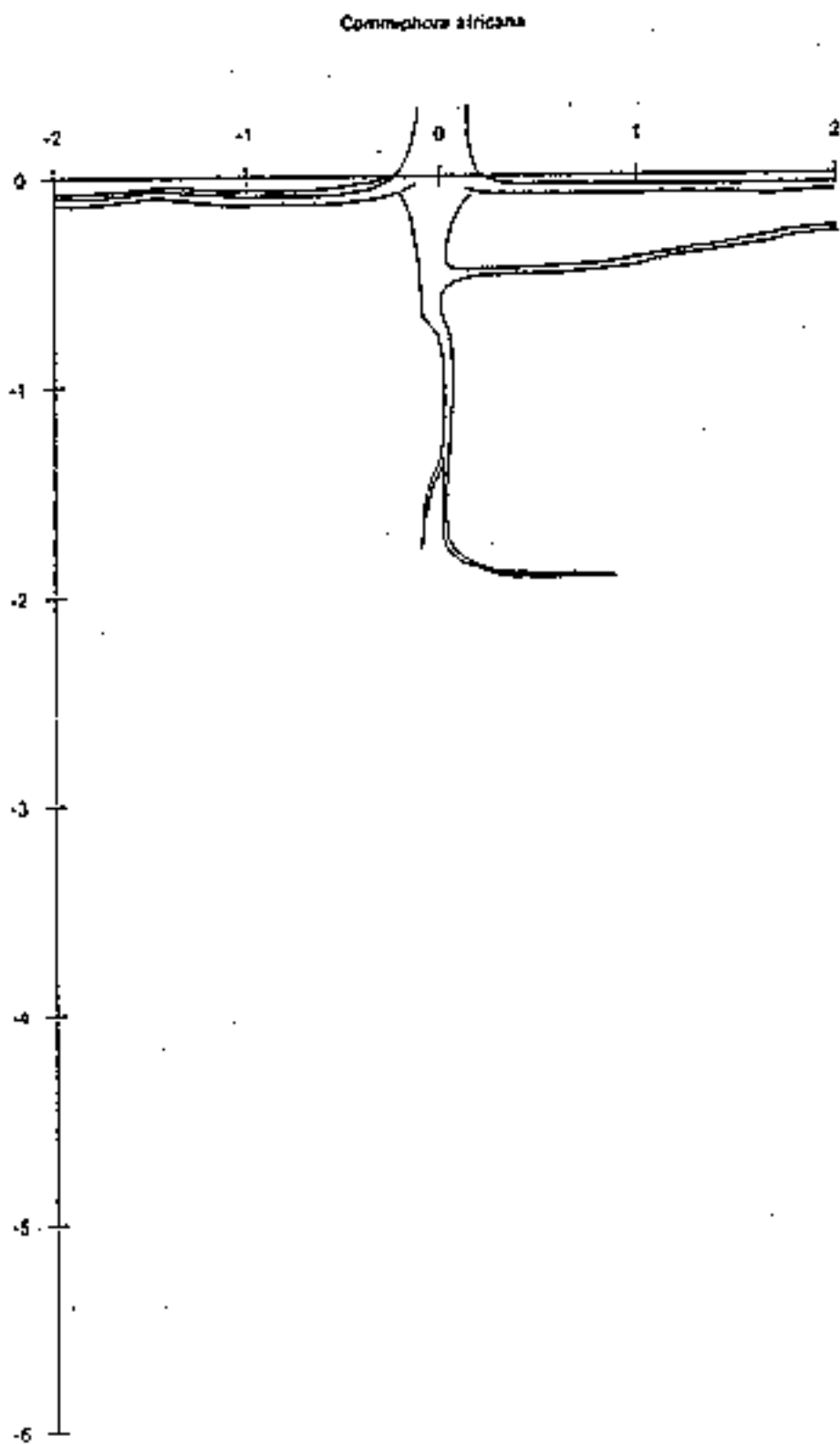


Figure II.4.6b : Commiphora africana.

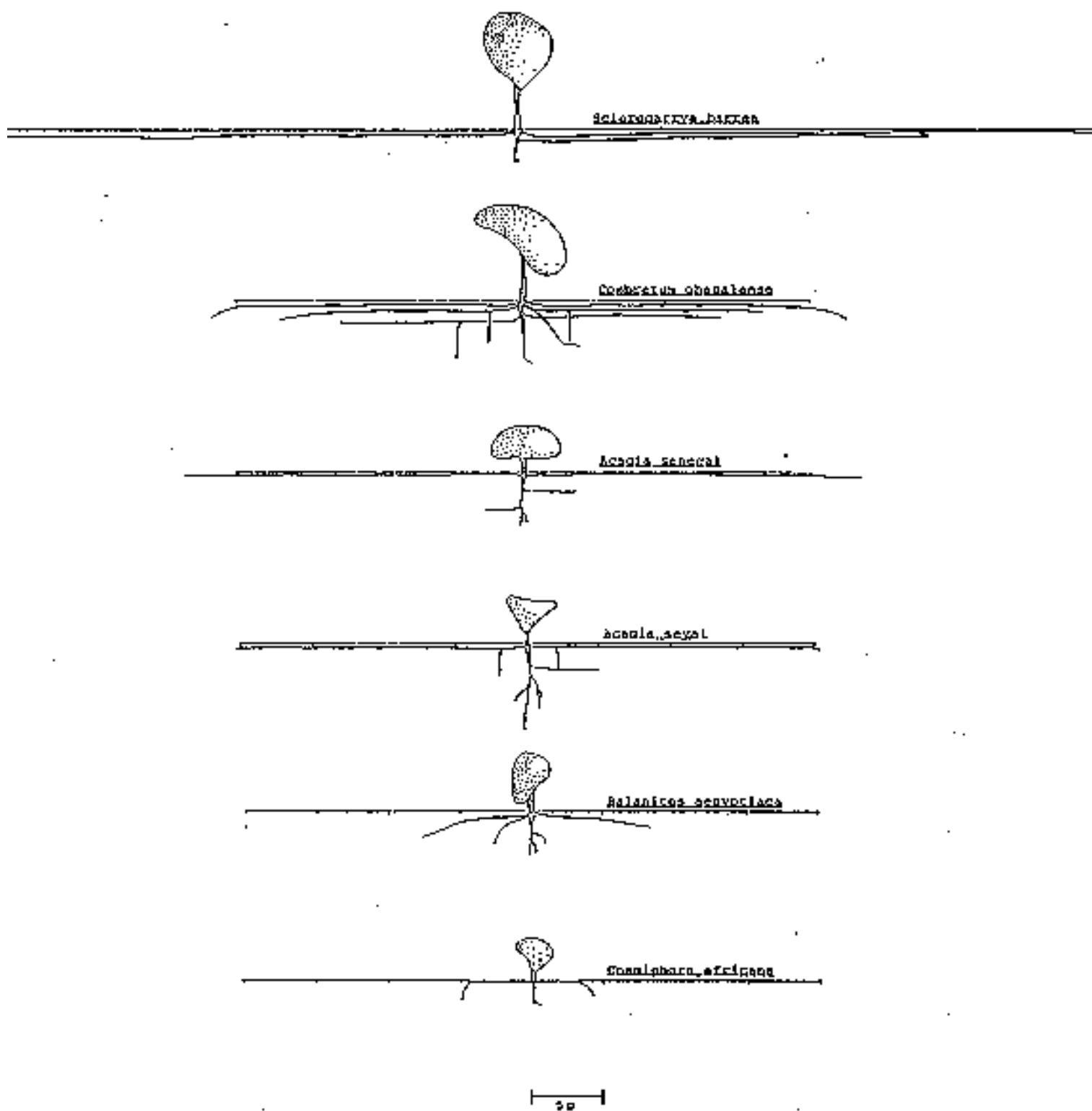


Figure II.4.7